

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

**Návrh a realizace automobilové zadní svítilny s RGB LED
(Hella)**

**Design and Realization of Automotive Rear Lamps with RGB
LEDs (Hella)**

Student:

Bc. Denis Hofman

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Denis Hofman

Studijní program:

N3943 Mechatronika

Studijní obor:

3906T007 Automobilová elektronika

Téma:

Návrh a realizace automobilové zadní svítilny s RGB LED (Hella)
Design and Realization of Automotive Rear Lamps with RGB LEDs
(Hella)

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte koncepci modulu zadní svítilny realizovanou maticí vícebarevných LED. Uvažujte s možností realizace většího počtu světelných funkcí (včetně animací). Proveďte výběr vhodného typu LED. Proveďte detailní návrh zapojení a vezměte v potaz energetickou účinnost, EMC, teplotní odolnost a náklady.
2. Realizujte navržený modul, včetně SW. Na vyrobeném vzorku implementujte různé obrazce a funkce zadní svítilny.
3. Proveďte experimentální testy navrženého vzorku, dle automotive požadavků (alespoň teplotní ověření termokamerou, EMC testy CE a BCI).

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A Systems Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 p., ISBN 1-4018-4831-1
- [2] RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 p., ISBN 0-7506-7599-3
- [3] DENTOM, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8
- [4] Dentom, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 20.10.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskievič, CSc.
proréktor pro studium

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šimoníka, Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 15.5.2017

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 15.5.2017

.....
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Denis Hofman.

Adresa trvalého pobytu autora práce: Třanovského 2397, Frýdek – Místek, Frýdek, 73801.

Poděkování

Rád bych zde poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Petru Šimoníkovi, PhD. za jeho věcné rady a připomínky k vypracování této práce. Nadále bych rád poděkoval svému externímu konzultantu, která probíhala ve firmě Hella Autotechnik Nova, s.r.o., Ing. Petru Opravilovi za jeho pomoc při vypracování zadání této práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval také kolegům a rodině, kteří byli nemalou podporou.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem zadní svítilny automobilu s RGB LED maticí a oživením jejich základních funkcí. V první části se práce zabývá nalezením vhodných typů LED diod a řídicího obvodu LED matice. Při návrhu je brán ohled na vhodné uspořádání a dostatečné svítivosti celé LED svítilny, náklady, teplotní odolnost, EMC a energetickou účinnost. Součástí jsou také návrhy posilujících obvodů pro řídicí obvody. V předposlední části jsou řešeny návrhy, realizace a oživení desek plošných spojů a dále návrh a realizace řídicího algoritmu pro jednotlivé funkce zadní svítilny na platformě Raspberry Pi 3. V poslední části je provedeno experimentální ověření v rámci automotive testů.

Klíčová slova

LED driver, LED matice, jazyk C, SPI, ST LED 524, Raspberry Pi 3

Abstract

This diploma thesis deals with the design of the rear RGB LED matrix lamp and also with the realization of basic functions by suitable algorithm. The first chapter is about finding suitable type of RGB LED and LED driver. This chapter also deals with figuring out how many LEDs are needed in order to fulfill the desired luminosity criteria, concerns costs, thermal immunity, EMC and energetic efficiency. The chapter includes the proposal of boost circuits for LED drivers and LED diodes. The next chapter contains the design, realization of PCBs and the design and realization of the control algorithm on Raspberry Pi 3 platform in order to create basic functions of rear lamp. The last chapter is about experimental verifying with respect to the automotive tests.

Keywords

C programming, LED driver, LED matrix, SPI, ST LED 524, Raspberry Pi 3

Seznam značek a symbolů

A_i	proudové zesílení [-],
A_{i1}	proudové zesílení podle nových hodnot rezistorů [-],
A_{i2}	proudové zesílení podle skutečných proudů větvemi [-],
d_{tf}	konstanta pro svícení 1/3 displeje [-],
$i(t)$	okamžitý proud [A],
I_{CM}	proud poskytovaný zdrojem proudu z STLED524 [mA],
I_{LED}	požadovaný proud LED diodou [mA],
$I_{LED(0^{\circ}C)}$	proud LED při teplotě okolí $0^{\circ}C$ [mA],
$I_{LED(100^{\circ}C)}$	proud LED při teplotě okolí $100^{\circ}C$ [mA],
$I_{LED(25^{\circ}C)}$	proud LED při teplotě okolí $25^{\circ}C$ [mA],
I_{LEDmax}	maximální proud daný tolerancemi rezistorů [mA],
I_{LEDmin}	minimální proud daný tolerancemi rezistorů [mA],
I_{MAX}	maximální odebíraný proud [mA],
I_{MAX1}	maximální odebíraný proud [mA],
I_{MAX2}	maximální odebíraný proud [mA],
I_{STLED}	maximální proud odebíraný obvodem STLED524 [mA],
$I_{stř}$	střední hodnota proudu [A],
I_v	svítivost [cd],
I_{vdisp}	maximální svítivost displeje na funkci [cd],
I_{VLED}	svítivost červené LED [cd/LED],
I_z	celkový okamžitý proud obvodu STLED524 [mA],
K_F	počet požadovaných funkcí [-],
K_f	počet sepnutých řad obvodu STLED524 [-],
k_{TEP}	konstanta přeměny elektrické energie v teplo [-],
L	délka materiálu ve směru šíření tepla [m],

l_{cu}	velikost galvanicky vyloučené mědi [m],
M	počet použitých LED [-],
M_{max}	maximální počet použitých LED [-],
M_{min}	minimální počet použitých LED [-],
n	počet proků [-],
P_0	příkon [mW],
P_{CM1}	ztrátový výkon na proudovém zrcadle [W],
P_{CM2}	ztrátový výkon na proudovém zrcadle [W],
$p_{\check{e}}$	počet LED čipů [-],
$P_{DST1/3}$	ztrátový třetinový výkon obvodu STLED524 [W],
P_{DSTLED}	ztrátový výkon obvodu STLED524 [W],
p_f	počet funkcí [-],
p_{LED}	počet LED diod ve sloupci [-],
P_{LED}	ztrátový výkon LED diody [mW],
P_{LED1}	ztrátový výkon na červené LED diodě [W],
P_{LED2}	ztrátový výkon na zel./modr. LED diodě [W],
$P_{LEDstř}$	střední ztrátový výkon LED diody [mW],
p_M	počet modulů [-],
P_{Q11}	ztrátový výkon na tranzistoru Q1[W],
P_{Q12}	ztrátový výkon tranzistoru [W],
P_{R1}	příkon na rezistoru R1 [W],
$p_{\check{r}}$	celkový maximální proud obvodu STLED524 [-],
$p_{\check{r}1/3}$	celkový třetinový proud obvodu STLED524 [-],
P_{TEP}	výkon který se na LED diodě mění v teplo [mW],
P_Z	ztrátový výkon zapojení [mW],
P_{ZFET}	maximální okamžitý ztrátový výkon na tranzistoru MOSFET [W],

$P_{Zstřed}$	maximální střední ztrátový výkon na tranzistoru MOSFET [W],
r	poloměr vrtání [m],
R_1	hodnota rezistoru [Ω],
R_2	hodnota rezistoru R2 [Ω],
R_{DS}	odpor MOSFETu v sepnutém stavu [Ω],
R_{th}	tepelný odpor ve směru šíření tepla [K/W],
$R_{th(j-a)}$	tepelný odpor pouzdro-okolí [K/W],
R_{thGP}	tepelný odpor tepelné podložky [K/W],
R_{thJA}	tepelný odpor pouzdro-okolí obvodu STLED524 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$],
R_{thjc}	tepelný odpor přechod-pouzdro [K/W],
R_{thR}	tepelný odpor chladiče [K/W],
R_{thR1}	elementární tepelný odpor chladiče [K/W],
R_{thT}	celkový tepelný odpor [K/W],
R_{thvie}	tepelný odpor prokovů [K/W],
S	střída multiplexu matice [-],
S_c	celková plocha prokovů [m ²],
S_t	plocha, kterou prostupuje teplo [m ²],
S_{vie1}	plocha jednoho prokovu [m ²],
T	perioda signálu [s],
t_0	počáteční hodnota času [s],
U	napěťová hladina [V],
U_{CC}	napájecí hladina [V],
U_{CM1}	úbytek napětí na proudovém zrcadle [V],
U_{CM2}	úbytek napětí na proudovém zrcadle [V],
U_{EC}	napětí mezi emitorem a kolektorem tranzistoru [V],
U_{EC1}	napětí na přechodu EC v zapojení s červenou diodou [V],

U_{EC2}	napětí na přechodu EC [V],
U_{LED}	napětí na LED diodě [V],
U_{LED1}	napětí na červené LED diod při $I_{LED} = 180 \text{ mA}$ [V],
U_{LED2}	napětí na zel./modr. LED diod při $I_{LED} = 180 \text{ mA}$ [V],
U_{R1}	napětí na rezistoru R1 [V],
U_{R2}	napětí na rezistoru R2 [V],
α	vyzařovací úhel [°],
ΔI_{LED-}	rozdíl proudů při ochlazení [mA],
ΔI_{LED+}	rozdíl proudů při oteplení [mA],
ΔI_T	možné pásmo pohybu proudu na základě tolerancí [mA],
ΔI_{T1}	možné pásmo pohybu proudu na základě tolerancí – horní mez [mA],
ΔI_{T2}	možné pásmo pohybu proudu na základě tolerancí – dolní mez [mA],
ΔT	rozdíl teplot pouzdro-okolí obvodu STLED524 [°C],
Δt_{LED}	rozdíl teplot [K],
Δt_{Q11}	rozdíl teplot [K],
Δt_{Q12}	rozdíl teplot [K],
η	účinnost zdroje [-].
λ	tepelná vodivost materiálu [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$],
π	Ludolfovo číslo [-],
ΣM	rozmezí LED diod pro všechny funkce [-],
Φ_V	světelný tok [lm].

Seznam zkratek

BGA	typ pouzdra pro povrchovou montáž, angl. Ball Grid Array
DPS	deska plošných spojů
FET	označení unipolárních tranzistorů, angl. Field-Effect Transistor
LED	typ diody, vyzařující světlo, angl. Light-Emitting Diode
MOSFET	typ unipolárních tranzistorů, angl. Metal Oxide Field-Effect Transistor
NZR	druh kódování sériové informace, angl. Non-return-to-zero
PC	osobní počítač, angl. Personal Computer
PCB	deska plošných spojů, angl. Printed Circuit Board
RGB	označení barev červená-zelená-modrá, angl. Red-Green-Blue
SoC	typ integrovaného obvodu, angl. System on Chip
SPI	typ sériové komunikace, angl. Serial Peripheral Interface
SS	označení pinů pro výběr obvodu, angl. Slave Selectn, Chip Select

Obsah

1	Úvod	1
2	Teoretické návrhy	2
2.1	Výběry základních součástek	7
2.2	Řízení proudu LED diodou	14
2.3	Zdroj napětí	34
3	Praktická realizace	38
3.1	LED modul	38
3.2	Řídicí modul	44
3.3	Zohlednění dalších parametrů	46
3.4	Firmware	47
4	Experimentální ověření	52
5	Závěr	54
6	Seznam použité literatury a zdrojů	56

1 Úvod

Automobilový průmysl je jeden z nejvíce se rozvíjejících průmyslů vůbec. Pro oblast střední Evropy tvoří významnou část ekonomiky. Za posledních 100 let se změnila tvář automobilového průmyslu, jak v oblasti výroby tak i vývoje. To postihlo také výrobce automobilového osvětlení.

První osvětlení se zrodilo již v počátcích automobilů. Prvním výrobcem, který takto užil osvětlení, byl Benz roku 1885. Tehdy představovalo osvětlení, pro nás již v tomto průmyslu nepředstavitelné, petrolejová lampa, karbidová lampa či dokonce svíčka.

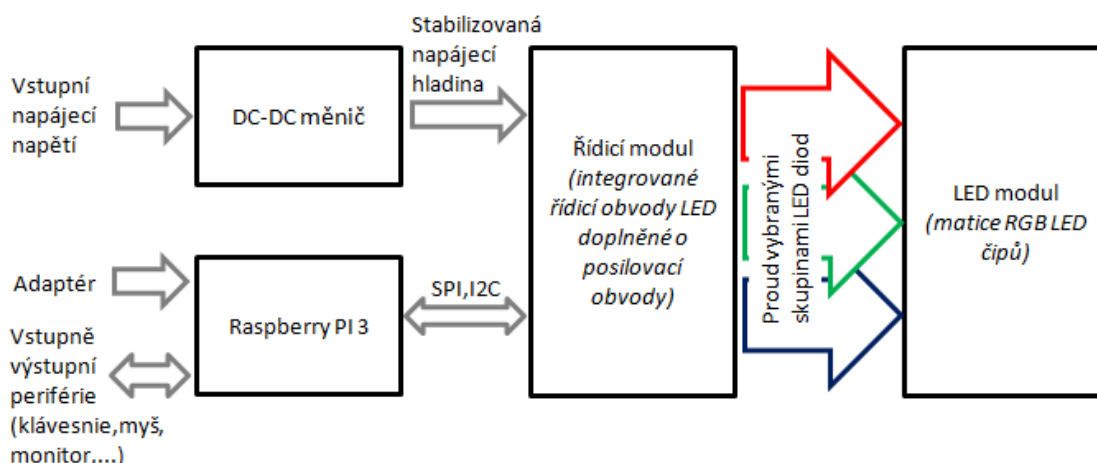
Zlom nastal roku 1913, kdy Robert Bosch přišel s koncepcí dynama, regulátoru, akumulátoru a žárovkou s vláknem. Do konce století potom nastávají změny, jež zlepšují osvětlení vozovky, zvyšují bezpečnost a komfort. Z pohledu osvětlení se do konce milénia využívá halogenových žárovek a xenonových výbojek. V tomto bodě, lze světlomet klasifikovat jako mechatronický systém. Od zastaralé žárovky s parabolou, dostáváme světlomety, jež se dokážou přizpůsobit okolním podmínkám adaptivním natáčením, změnou sklonu při akceleraci a brzdění či měnit tvar světelného kuželu.

V současnosti se již ustupuje od mechanicky ovládaných prvků, které byly nutné pro ovládání světel automobilu. Technicky mnohem chytřejší koncepcí je využití LED diod. Trend byl odstartován v roce 2008, díky němuž se dostávají klasické světlomety do ústupu a dotýká se jak svítilen předních, tak i zadních. Nový přístup umožňuje lepších výsledků při bezpečnosti a komfortu jízdy. Matice LED diod, ze kterých jsou tyto světla složeny, jsou pak schopny světlo ztlumovat, či při jízdě neoslňovat díky zapínání a vypínání vybraných skupin LED diod.

U zadních skupinových svítilen je tento trend již v pohybu a směřuje k čím dál větší integraci LED diod. Tím se vývojářům otevírá možnost, pojmout zadní svítilnu jako displej a neomezovat se v tvarech jednotlivých funkcí svítilny, či je dokonce měnit na základě požadavků.

2 Teoretické návrhy

Návrh se bude opírat o základní představu o tom, jak by mohlo vypadat celkové zapojení (viz. Obr. 1). Aby bylo možné programovatelně řídit rozsvěcování skupin LED je zde řídicí jednotka, či spíše řídicí počítač Raspberry PI 3, kde poběží obslužný algoritmus. Pro udržení požadované napájecí hladiny, by měl sloužit DC-DC měnič. Ten by měl napájet jednak řídicí modul a také modul s LED diodami. Komunikaci mezi řídicím počítačem a řídicím modulem bude možné provádět pomocí sériových protokolů. Vstupem uživatele, může být např.: skupina tlačítek, nebo klávesnice, myš a monitor.



Obr. 1 – Blokové schéma celého zapojení

Chce-li být při návrhu docíleno stejného světelného efektu zadní svítilny jako u automobilů, které splňují legislativu, bude nutné si stanovit základní rámec parametrů jednotlivých funkcí svítilny. Parametry stanovuje norma UNECE/EHK, která spravuje parametry svítílen v 56 zemích světa. Normy stanovují, jak svítivost maximální, tak minimální. Mimo jiné určují prostorové úhly rozložení světla na vodorovné a svislé ose.

Tato práce se zabývá zadní svítilnou a nebere v potaz, jaké budou vyzařovací úhly daných funkcí. Pouze bude brán ohled na požadovanou svítivost, která bude zásadní při výběru zdroje světla pro funkci zadní svítilny: směrové světlo, brzdové světlo, obrysové světlo, zpětné a zadní světlo (viz. Obr. 2).



Obr. 2 – Zadní skupinové světlo BMW E71 X6 [1]

Předpisy stanovující vlastnosti jednotlivých funkcí zadní svítilny jsou:

- EHK č. 6 - směrové světlo,
- EHK č. 7 - brzdové a obrysové světlo,
- EHK č. 23 - zpětné světlo,
- EHK č. 38 - zadní světlo,
- EHK č. 3 - odrazky.

Z těchto předpisů vyplývají parametry svítivosti, pro jednotlivé funkce zadní svítilny viz Tab. 1.

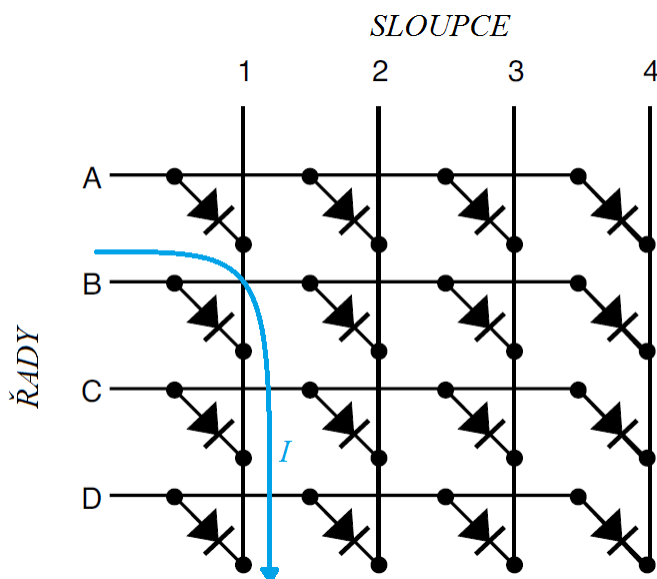
Tab. 1 - rozmezí svítivosti jednotlivých funkcí zadní svítilny

Funkce	Svítivost I_v [cd]
Obrysová světla	4 – 17
Brzdová světla	60 – 260
Mlhová světla	150 – 300
Směrová světla	50 – 500
Zpětné světlo	80 - 300

Tvorba obrazu v matici LED diod

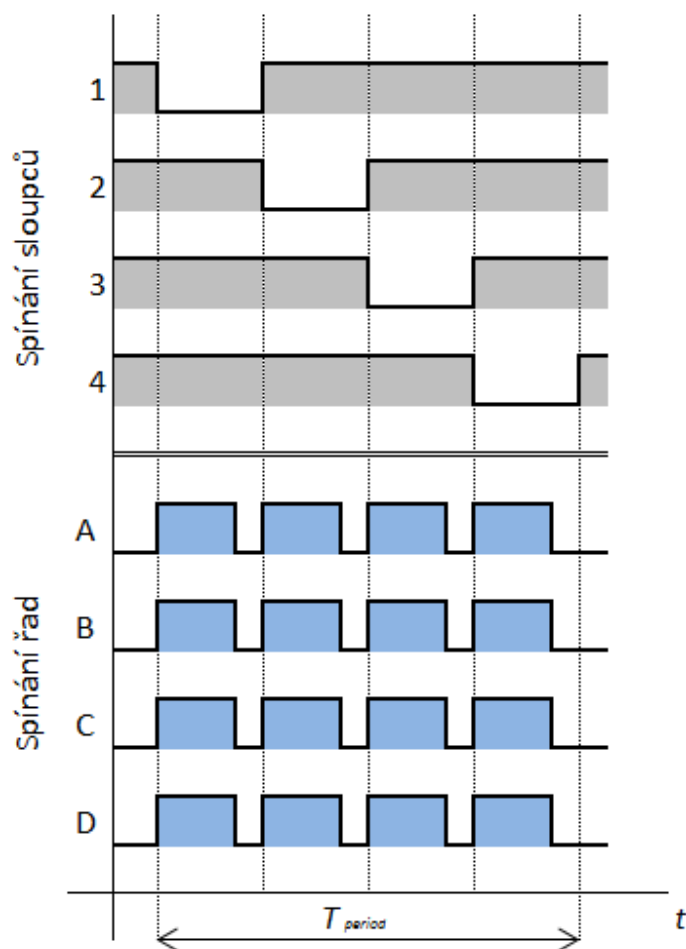
Jako elementární zdroj světla je zde LED dioda. Maticové uspořádání LED diod je nevhodnější a nejjednodušší pro tuto aplikaci z pohledu ovládání. Pro vytváření různých funkcí svítily a možností grafické úpravy těchto funkcí je nutné použít relativně velké množství těchto bodových zdrojů světla. Díky velkému množství se zlepšuje rozlišení a v konečném důsledku zapojení bude působit jako display.

Chceme – li v matici např. rozsvítit LED diodu na pozici *BI*, viz *Obr. 3*, bude nutné splnit dvě podmínky. Přivést kladné napětí k anodě přes řadu *B* a také zem přes sloupec *I*.



Obr. 3 – Matice LED diod v zapojení se společnou katodou [2]

Pro tvorbu obrazců a složitějších tvarů v matici se využívá tzv. multiplexování. Periodicky se zapínají jednotlivé sloupce, tak že v jeden okamžik je možné rozsvítit vždy kombinaci LED diod tohoto sloupce. Děje – li se toto spínání dostatečně rychle, vzniká plynulý obraz. Dnes tuto práci odvádí integrované obvody (angl. *LED dot driver*, *metrix LED driver*). Příklad schématu spínání je znázorněno na obrázku *Obr. 4*.



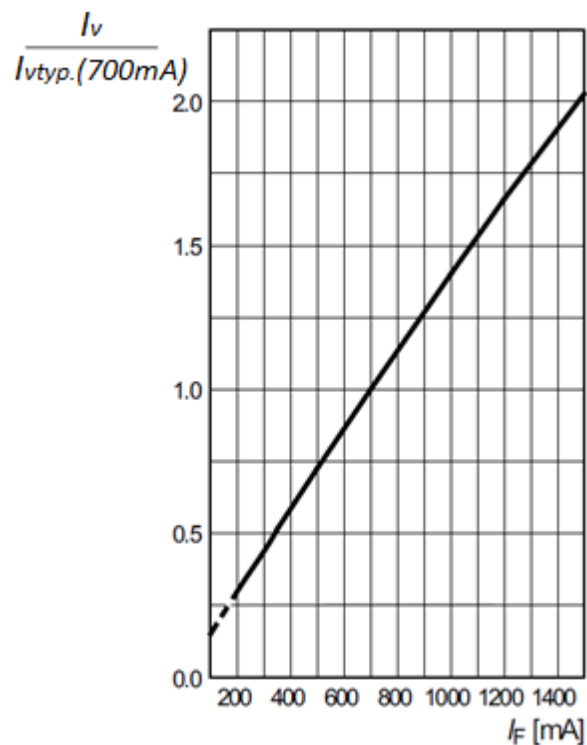
Obr. 4 – Průběhy spínání řad a sloupců matice – maticový multiplex

Se spínáním sloupců matice se pojí také střední hodnota proudu (angl. *average current*). Čím více máme sloupců k spínání LED diod, tím více se redukuje střední hodnota proudu procházející LED diodou. Střední hodnota proudu je definována jako hodnota stejnosměrného proudu I jež přenesle stejný elektrický náboj jako časový průběh proudu $i(t)$ za jednu periodu [3].

$$I_{stř} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \cdot dt \quad (1)$$

Kde: $I_{stř}$ - střední hodnota proudu [A], T - perioda signálu [s], t_0 - počáteční hodnota času [s], $i(t)$ - okamžitý proud [A].

Hodnota proudu, resp. střední hodnota proudu $I_{stř}$ souvisí přímo úměrně se svítivostí LED diody. Se snižující se hodnotou tohoto proudu klesá i svítivost – LED dioda emituje světlo kratší dobu a výsledným dojmem působí ztlumeně. Typická závislost mezi proudem diodou $I_F[mA]$ a svítivostí $I_V[cd]$, resp. relativní svítivosti je znázorněn na obrázku Obr. 5.



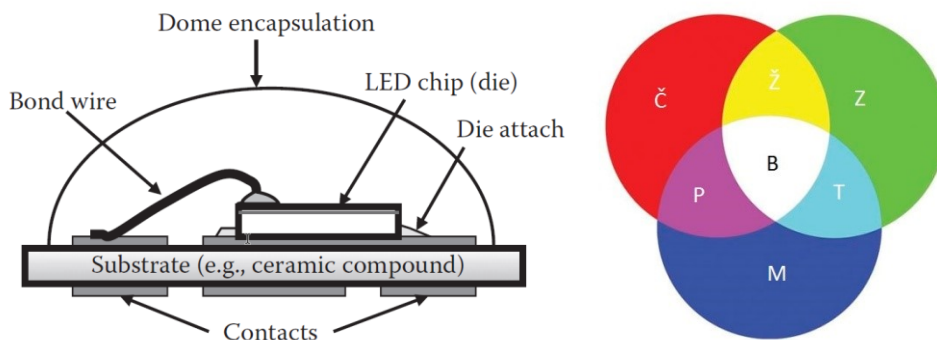
Obr. 5 - Typická závislost relativní intenzity světla $I_v/I_{vtyp.(700mA)}$ a proudu LED diodou I_F (červená LED dioda) [4]

Z toho vyplývá, že chceme – li dosáhnout světelného efektu, který odpovídá mezím z tabulky Tab. 1, bude nutné buď to zvýšit okamžitý proud diody, nebo snížit počet spínaných sloupců matice. V konečném důsledku jde o to, najít optimum mezi obojím, z pohledu LED diody a také řídicího integrovaného obvodu (zkr. IO).

2.1 Výběry základních součástek

Výběr LED diody

Výběr LED diody je průnikem potřebných vlastností a také cenou. Byly vybírány RGB LED chip diody – v jednom pouzdře se nachází červená, zelená a modrá LED dioda – pro možnost vytváření více funkcí zadní svítlny. Funkce mají předepsanou barvu jako např.: červená pro brzdné světlo, oranžová pro směrové, bílá pro zpětné světlo, atp. Jiné barvy než červená, zelená a modrá jsou pouhou aditivní kombinací těchto tří, potažmo dvou základních barev (viz Obr. 6).



Obr. 6 – Detail LED diody a míchání barev světla, které se podřizuje pravidlům aditivního míchání (základní: Č – červená, M – modrá, Z – zelená; namíchané: P – purpurová, T – tyrkysová, Ž – žlutá, B – bílá) [5], [7]

Hlavními parametry jsou svítivost a poměr špičkového proudu k proudu, při němž je daná svítivost definována (angl. *surge/typical current ratio*). Z pohledu maximálního proudu je dioda nejvíce omezena teplotou, která vzniká při průchodu proudu. Nejcitlivější částí bývá kontaktní drátek (angl. *bond wire*), který spojuje polovodič s elektrodou (viz Obr. 6). Z pravidla bývá z ušlechtilého kovu, jako je zlato či stříbro. Dalším hlavním parametrem bude maximální teplota přechodu a tedy pro nás požadavek na chlazení LED diody vzhledem ke ztrátovému výkonu. Tento poslední parametr bude zohledněn při návrhu desky plošného spoje (čes. zkr. *DPS*, angl. zkr. *PCB*).

V tabulce Tab. 2 níže jsou uvedeny návrhy LED diod vhodných k aplikaci. Na základě vybrané LED diody bude nutné zohlednit, jaké množství bude v matici potřeba. S tímto jde ruku v ruce výběr řídicího integrovaného obvodu.

Tab. 2 – Seznam vhodných LED diod

LED dioda	I_{V-RED} [cd]	α [°]	I_{pulse}/I_{Typ} [-]	I_{Max} [mA]	Cena [kč/ks]
LE RTDUW S2W	16	120	2,14	1000	208
LRTB GRTG	1	120	5	30	12,1
LRTB GVSG	0,8	120	5	40	13,2
OSTCMBS4C1A	1	120	6	50	5,8
OSTCXBSGC1E	6,3	120	1,7	200	19,3
WS2812S	0,6	-	-	20	4,1

Někteří výrobci neuvádějí svítivost $I_V[cd]$ LED diod, ale hodnotu světelného toku $\Phi_V[lm]$. Ten souvisí také s vyzařovacím úhlem α [°]. Vztah pro převod je [6]:

$$I_V = \frac{\Phi_V}{2\pi(1-\cos(\alpha/2))} \quad (2)$$

kde: I_V - svítivost [cd], Φ_V - světelný tok [lm], α - vyzařovací úhel [°].

Pro vyzařovací úhel $\alpha = 120^\circ$ platí:

$$I_V = \frac{\Phi_V}{\pi} \quad (3)$$

Zajímavým řešením je LED čip WS2812S od výrobce Worldsemi, která disponuje ve svém pouzdře mimo LED diod také integrovaným obvodem. Pro každou diodu, resp. čip se vysílá 24-bitová zpráva o ztlumení každé z diod. Dané LED čipy se řadí za sebou sériově a informace se posílají pomocí sériového protokolu (NZR komunikační mód) a vzniká jedna dlouhá sériová zpráva. Ačkoli by se jednalo o zajímavý přístup a jednoduchost, jsou tyto LED čipy používány v oblasti hobby a zábavního průmyslu. Nelze garantovat stanovenou svítivost a či minimalizovat poruchovost.

Z opačného spektra je možné využít super-svítivé LED čipy od výrobce OSRAM, ovšem nepříznivým faktem je cena – pro realizaci funkcí bude potřeb relativně velkého počtu diod, aby vznikl dojem na sebe navazujícího obrazu. Zde bychom ani nevyužili celého potenciálu svítivosti LED diod. Typická aplikace je v osvětlovací technice, či projektorech.

Výběr LED čipu připadl na **OSTCXBSGC1E** od výrobce **OptoSupply**. Má přijatelnou cenu na jednotku množství a výhodou je také jeho svítivost. Vyrábí se v pouzdře PLCC6 (5050). Podrobnější parametry tohoto LED čipu jsou, viz Tab. 3 a Tab. 4 [8]:

Tab. 3 – Absolutní parametry LED čipu

Parametr	Symbol	Červená LED	Modrá/zelená LED
Stejnoseměrný proud	$I_F [mA]$	200	200
Pulzní proud	$I_{Pulse} [mA]$	250	250
Ztrátový výkon	$P_D [mW]$	600	800
Provozní teplota	$T_{Operating} [^{\circ}C]$	-30 ~ 85	

Tab. 4 – Elektro-optické vlastnosti LED čipu

Parametr	Symbol	Min.	Typ.	Max
Propustné napětí	$U_F(\text{červ.}) [V]$	2	2,5	3
	$U_F(\text{modr.}) [V]$	3	3,3	4
	$U_F(\text{zel.}) [V]$	3	3,3	4
Světelný tok	$\Phi_V(\text{červ.}) [lm]$	15	20	-
	$\Phi_V(\text{modr.}) [lm]$	5	10	-
	$\Phi_V(\text{zel.}) [lm]$	20	30	-
Svítivost	$I_V(\text{červ.}) [cd]$	4,8	6,3	-
	$I_V(\text{modr.}) [cd]$	1,6	3,2	-
	$I_V(\text{zel.}) [cd]$	6,3	9,6	-

*hodnoty jsou uvedeny při podmínkách $I_F = 150 \text{ mA}$

**přepočítání světelného toku na svítivost bylo provedeno podle vzorce (3)

Výběr řídicího integrovaného obvodu

Z podstaty výběr řídicího obvodu není omezen výkonnostními parametry, jako je maximální proud poskytovaný obvodem, jelikož bude nutné v každém případě obvod doplnit posilovacími obvody. Nejdůležitějšími parametry jsou: možnost kaskádového řazení, maximální počet ovládaných LED diod, počet ovládaných sloupců. Za další cena, dostupnost, komunikace, pouzdro.

V tabulce níže Tab. 5 jsou uvedeny obvody, mezi kterými probíhal výběr. Většina z těchto obvodů jsou v pouzdře BGA (angl. *Ball Grid Array*). Cenově je většina z nich srovnatelná, co se týče k poměru celkové pořizovací ceny a výroby až zanedbatelná.

Tab. 5 – Srovnání řídicích obvodů pro LED matice

Int. Obvod	Max. LED	Komunikace	Pouzdro	Střída*	Cena [kč]**
ams AS1119	132	I2C	BGA 36 -pin	1/9 (1/6)	238
Panasonic AN32054B	119	I2C, SPI	BGA 50 -pin	1/7	90
Rohm BD26503GUL	119	I2C, SPI	BGA 48 -pin	1/7	60
ST Microelectronics STLED524	120	SPI	BGA 56 -pin	1/5	68
ISSI IS31FL3737	144	I2C	QFN 40 -pin	1/12	64

* (angl. Duty Cycle) říká, jaký poměr je mezi dobou zapnutí jednoho sloupce k celkové době, kdy se zapnou postupně všechny sloupce – čím vyšší poměr, tím menší nároky na LED diody

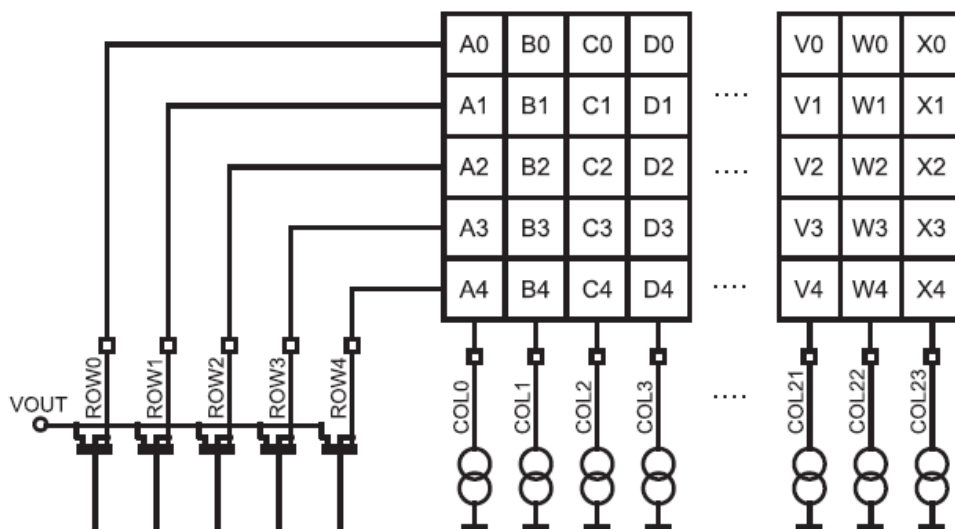
**cena je přepočtena a zaokrouhlena z amerického dolaru na české koruny

Z pohledu pouzdra by byl nejvhodnějším obvod výrobce ISSI – nebylo by nutné použít, při uvážení návrhu více jak dvou vrstvou DPS. Co se týče kaskádového zapojení, je schopen spolupracovat dohromady se 4 - mi čipy a tím by se celkový počet použitých LED diod zvýšil na 576, tj. 192 RGB LED čipů. Ovšem naproti výhodám stojí fakt, že by bylo nutné dbát opatrnosti při návrhu komunikačních cest na DPS (I2C je citlivější na rušení, než sběrnice SPI). Dále je zde vyšší nárok na použití svítivějších LED diod, tak aby bylo potlačeno nízké střídání.

Jako konečným řešením tohoto výběru byl obvod od výrobce **ST Microelectronics**. Mezi nevýhody se řadí pouzdro, kdy bude muset být uvažováno o více jak dvouvrstvé DPS (čtyřvrstvá bude dostatečná) – což v konečném důsledku zvedne cenu DPS. Velkými výhodami tohoto obvodu je vysoký poměr střídání, dále komunikace po sběrnici SPI a neomezené kaskádové zapojení těchto obvodů. K výhodám se řadí také komunikativní zastoupení v České Republice a dostupnost.

Vlastnosti integrovaného řídicího obvodu STLED524

Obvod disponuje pěti sloupci představujících spínací prvky, které přivádějí kladné napětí k anodě LED diody a dvaceti čtyřmi řadami představujících proudová zrcadla jako zdroj konstantního proudu v zapojení k zemi viz Obr. 7. Detailní zapojení obvodu je součástí přílohy A.



Obr. 7 – Schéma řízení matice obvodu STLED524[9]

Napájecí napětí je v rozmezí 2,7 V až 5,5 V. Každým bodem (LED diodou) může procházet proud o velikost až 20 mA. Ten je nastavitelný vnějším rezistorem R_{SET} . Obvod má vnitřní DC-DC posilovací měnič (angl. *boost, step-up converter*) poskytující nastavitelné napájení v rozmezí od 2,8 V do 4,6 V pro LED diody. Tímto je možné redukovat ztrátový výkon obvodu – nastavení probíhá na vnitřním registru. Maximální celkový proud, jaký by neměl být překročen v posilovacím módu je 480 mA. Jakýkoliv zdroj proudu (proudové zrcadlo, řada) může být nastaveno s rozdílnou střídou (PWM od 0 po 255 kroků) pro daný sloupec v rámci periody. Obnovovací frekvence displeje je 234 Hz, tedy perioda, během které sepnou všechny sloupce matice je 4,26 ms. SPI komunikace probíhá při hodinovém kmitočtu 20 MHz. Obvod má tepelnou ochranu při překročení teploty +170 °C. Maximální teplota mezi okolím a pouzdrem je +125 °C. Tepelný odpor mezi pouzdrem a okolím je 62 °C/W [9].

Dimenzování LED matice

Pro dimenzování matice je zásadní, co by mělo být očekávaným cílem. Vzhledem k faktu, že matici budeme provozovat jako zadní kombinovanou svítidnu, bude nutné si stanovit, jaké funkce na ní budeme provozovat. Zásadní pro zadní svítidnu jsou funkce tyto: *brzdové světlo*, *obrysové světlo* a *směrové světlo*. Mimo jiné také mlhové a zpětné světlo. Jako vztažné rozmezí svítivosti je optimální rozmezí brzděného světla, tj. 60 ~ 260 cd viz tabulka Tab. 1. Toto rozmezí je průnikem všech požadovaných parametrů svítivosti – nižší svítivost jsme schopni realizovat nižší hodnotou střidy PWM. Pokud si displej pomyslně rozdělím na třetiny podle těchto tří funkcí a víme maximální svítivost červené LED diod, tj 6,3 cd při proudu 150 mA se střidou (angl. *duty cycle*) 1/5, můžeme odvozovat počet použitých LED:

$$M = \frac{I_{Vdisp}}{I_{VLED} \cdot S} \quad (4)$$

kde: M - počet použitých LED [-], I_{Vdisp} - maximální svítivost displeje na funkci [cd], I_{VLED} - svítivost červené LED [cd/LED], S - střída multiplexu matice [-].

Maximální počet LED diod na funkci:

$$M_{max} = \frac{I_{Vdisp}}{I_{VLED} \cdot S} = \frac{260}{6,3 \cdot 1/5} \approx 206 \text{ LED diod}$$

Minimální počet LED diod na funkci:

$$M_{min} = \frac{I_{Vdisp}}{I_{VLED} \cdot S} = \frac{60}{6,3 \cdot 1/5} \approx 48 \text{ LED diod}$$

Současně platí, že výsledkem součtu svítivosti jednotlivých diod dosáhneme výslednou svítivost displeje za předpokladu, že jsou elementární zdroje svítivosti, tj. LED diody, dostatečně blízko sebe. Je nutné dbát na tento fakt při návrhu DPS a snažit se o co nejhustší osazení.

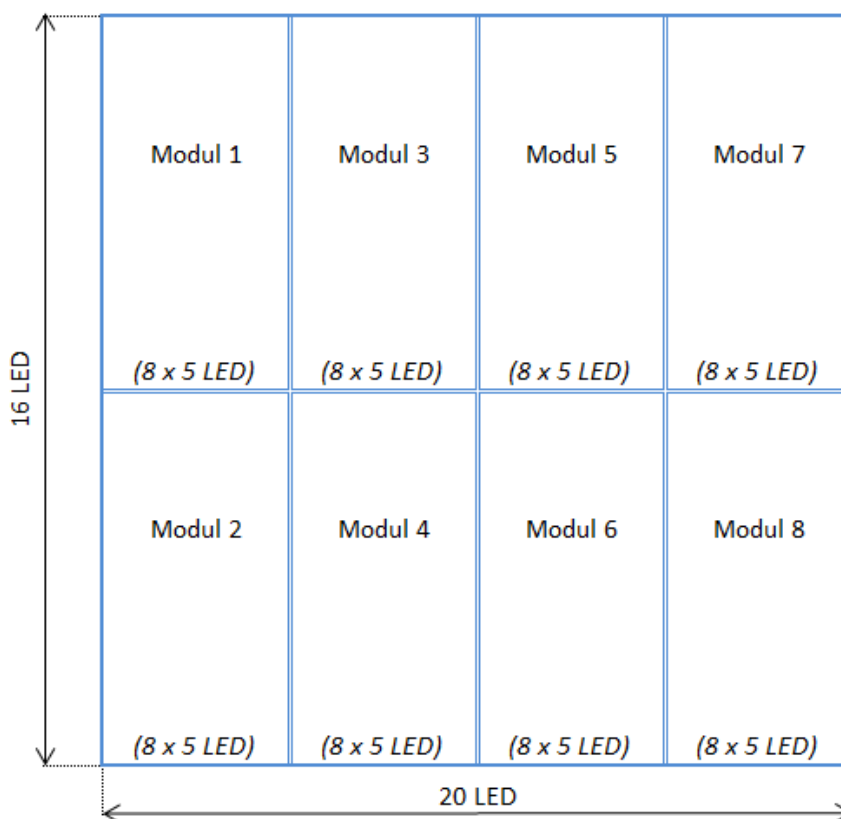
Rozmezí počtu LED diod pro všechny funkce:

$$\Sigma M = K_F \cdot (M_{min} \sim M_{max}) \quad (5)$$

kde: ΣM - rozmezí LED diod pro všechny funkce [-], K_F - počet požadovaných funkcí[-].

$$\Sigma M = K_F \cdot (M_{min} \sim M_{max}) = 3 \cdot (48 \sim 206) \approx 144 \sim 618 \text{ LED diod}$$

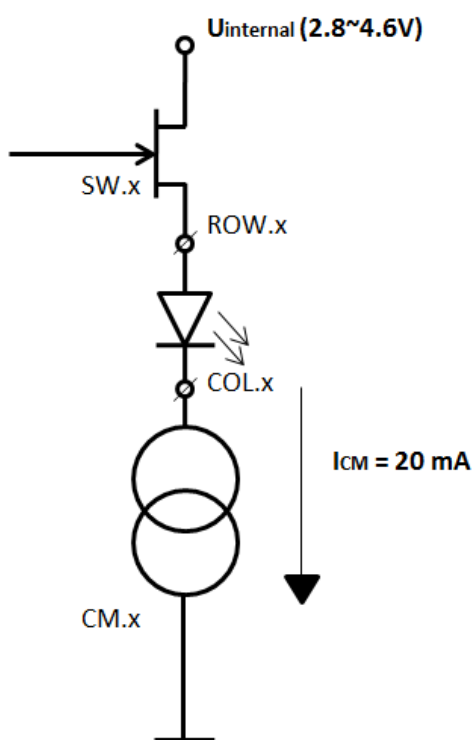
Je zde brán ohled na možnosti LED řídicího obvodu s tím, že jako modul je schopen obsloužit 120 LED diod – tedy 40 RGB LED čipů. V daném rozmezí to znamená, že by měl displej obsahovat minimálně 4 a maximálně 15 těchto obvodů. Výsledné počty jsou optimem mezi množstvím, kvalitou a také cenou, proto stanovují počet použitých obvodů na **8**, tj. binární počet – tímto je stanovena i geometrická symetrie displeje. Na základě těchto propočtů stanovují počet LED diod, respektive LED čipů na **320**. Rozložení těchto modulů je vystihnuto na obrázku *Obr. 8*.



Obr. 8 – Moduly LED displeje a jejich rozložení

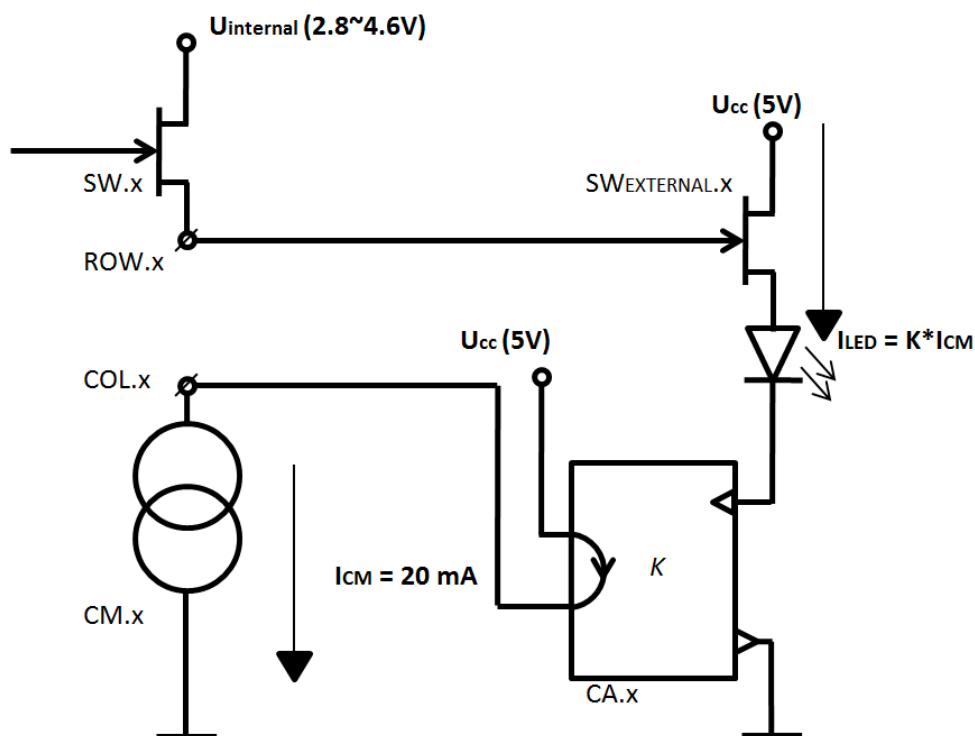
2.2 Řízení proudu LED diodou

Pro řízení proudu diodou a tedy i její svítivosti je zde integrovaný obvod STLED524. Pro usnadnění práce s nastavováním proudu LED je nezbytné navrhnout náhradní schéma. Z pohledu elektroniky je toto schéma myšleno zapojení LED diody a koncových stupňů obvodu STLED524. Jak již, bylo zmíněno, obvod není možné provozovat s vyššími výstupními proudy na prvek (LED diodou) než je 20 mA. Proto je nezbytné, aby byl doplněn posilovacími obvody. Náhradní schéma řídicího obvodu je na obrázku *Obr. 9*.



Obr. 9 – Náhradní schéma obvodu STLED524

Obvod využívá interní napájení z integrovaného DC-DC měniče (U_{internal}). Mezi svorkami ROW.x a COL.x (řádky a sloupce) se nachází LED dioda. Je-li přivedeno kladné napájecí napětí k anodě, přes spínací prvek SW.x a zároveň přes zdroj proudu CM.x je přivedena zem, potom LED dioda emituje světlo. V našem případě je situace jiná, proud diodou bude několikanásobně větší, proto se mezi svorkami ROW.x a COL.x budou nacházet posilovací obvody viz *Obr. 10*.



Obr. 10 – Náhradní schéma s posilovacími obvody

Prvek CA.x v náhradním schématu s posilovacími obvody je schematicky značený proudový zesilovač [10], jehož proudové zesílení je A_i . Prakticky bude realizován pomocí asymetricky nastaveného proudového zrcadla, viz následující kapitola. Proud I_{LED} stanovují na 200 mA. Svítivost tedy bude větší jak $I_V = 6,3$ cd ($I_{LED} = 150$ mA) při kontinuálním proudu. Toto je opřeno křivku závislosti svítivosti na proudu viz Obr. 5. Zesílení proudu je potom $A_i = 10$.

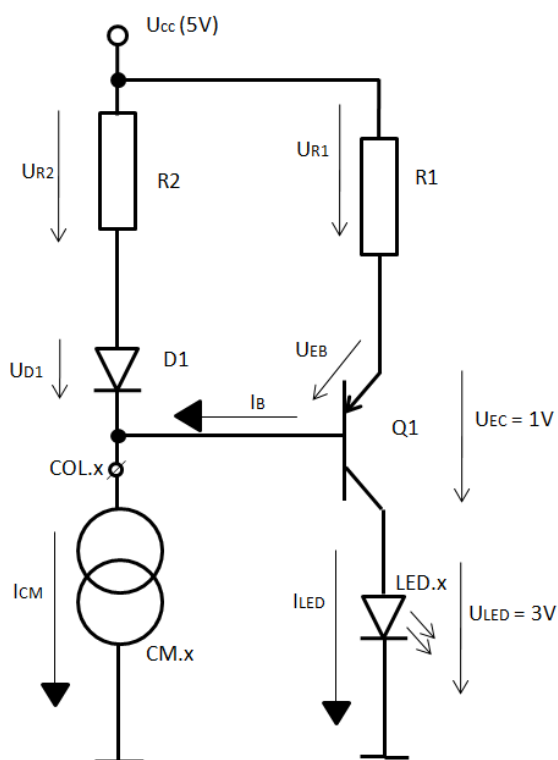
Proudový zdroj řízený proudem

Proudový zdroj řízený proudem pro LED diody by měl splňovat podmínku:

$$I_{LED} = A_i \cdot I_{CM} \quad (6)$$

kde: I_{LED} - požadovaný proud LED diodou [mA], I_{CM} - proud poskytovaný zdrojem proudu z integrovaného obvodu [mA], A_i - proudové zesílení [-].

V dané aplikaci je jako aktivní prvek využit bipolární tranzistor PNP, vzhledem k povaze proudového zdroje v integrovaném obvodu. Je snahou získat násobný proud ve větvi s LED diodou, proto jsou rezistory R1 a R2 s rozdílnými hodnotami. Zároveň je požadování, aby se tranzistor provozoval v aktivním režimu a nedostával se saturace, proto jsou nezbytné výpočty. V primární větvi se nachází místo tranzistoru dioda, aby bylo co možná nejlépe dosaženo podobného chování jako u PN přechodu na tranzistoru mezi emitorem a bází. Důvodem pro použití diody je fakt, že nejsme schopni najít dva totožné tranzistory a proto jejich vlastnosti vždy budou jiné – panují jiné výkonové podmínky a oteplení prvků bude různé, tím i zesilovací činitel h_{21e} . Ušetří se mimo jiné místo na DPS. Zapojení na DPS je posíleno elektrolytickými kondenzátory s nízkou impedancí jako zdroje napětí a proudu během fáze, kdy LED diodou prochází proud. Na následujícím obrázku *Obr. 11* je vystiženo schéma zapojení.



Obr. 11 – Proudový zdroj řízený proudem

Pro zjednodušení budeme předpokládat následující:

- $I_B = 0$, vzhledem k tomu, že je tento parametr h_{21e} ($\approx 100 \sim 140$) krát menší než proud protékající mezi kolektorem a emitorem tranzistoru,
- úbytek napětí $U_{D1} = U_{EB}$, tedy, jakoby oba přechody PN měly stejné vlastnosti.

Zvolíme si požadované úbytky napětí na tranzistoru U_{CE} a na LED diodě U_{LED} , potom můžeme psát následující (viz Obr. 11):

$$U_{R1} = U_{cc} - U_{EC} - U_{LED} \quad (7)$$

kde: U_{R1} - napětí na rezistoru R_1 [V], U_{CC} - napájecí hladina [V], U_{EC} - napětí mezi emitorem a kolektorem tranzistoru [V], U_{LED} - napětí na LED diodě [V].

$$U_{R1} = U_{cc} - U_{EC} - U_{LED} = 5 - 1 - 3 = 1V$$

Potom můžeme odvozovat podle Ohmova zákona hodnotu rezistoru R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_{LED}} \quad (8)$$

kde: U_{R1} - napětí na rezistoru R_1 [V], R_1 - hodnota rezistoru [Ω], I_{LED} - proud procházející LED diodou [mA].

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_{LED}} = \frac{1}{0.2} = 5\Omega$$

Jelikož jsou napěťové podmínky na rezistorech v obou větvích přibližně stejné:

$$U_{R1} = U_{R2} \quad (9)$$

kde: U_{R1} - napětí na rezistoru R_1 [V], U_{R2} - napětí na rezistoru R_2 [V].

Můžeme odvodit z Ohmova zákona hodnotu rezistoru R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_{CM}} \quad (10)$$

kde: U_{R2} - napětí na rezistoru R_2 [V], R_2 - hodnota rezistoru R_2 [Ω], I_{CM} - proud procházející zdrojem proudu STLED524 [mA].

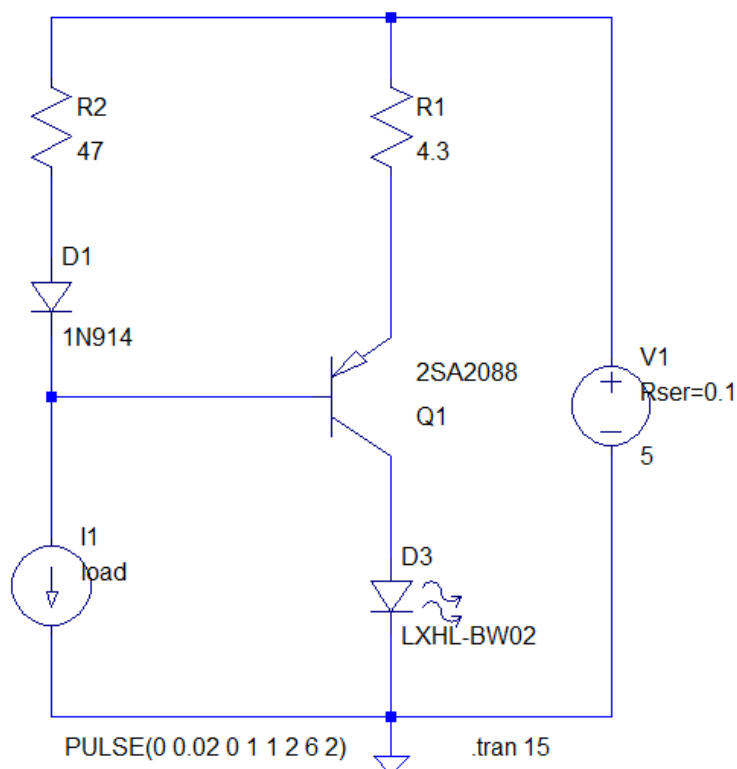
$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_{CM}} = \frac{1}{0.02} = 50 \Omega$$

Zesílení proudu můžeme potom vyjádřit takto (viz vzorec 6):

$$A_i = \frac{I_{LED}}{I_{CM}} \approx \frac{R_2}{R_1} [-] \quad (11)$$

kde: A_i - proudové zesílení [-], R_1 - rezistor ve větvi s tranzistorem [Ω], R_2 - rezistor ve větvi s diodou [Ω].

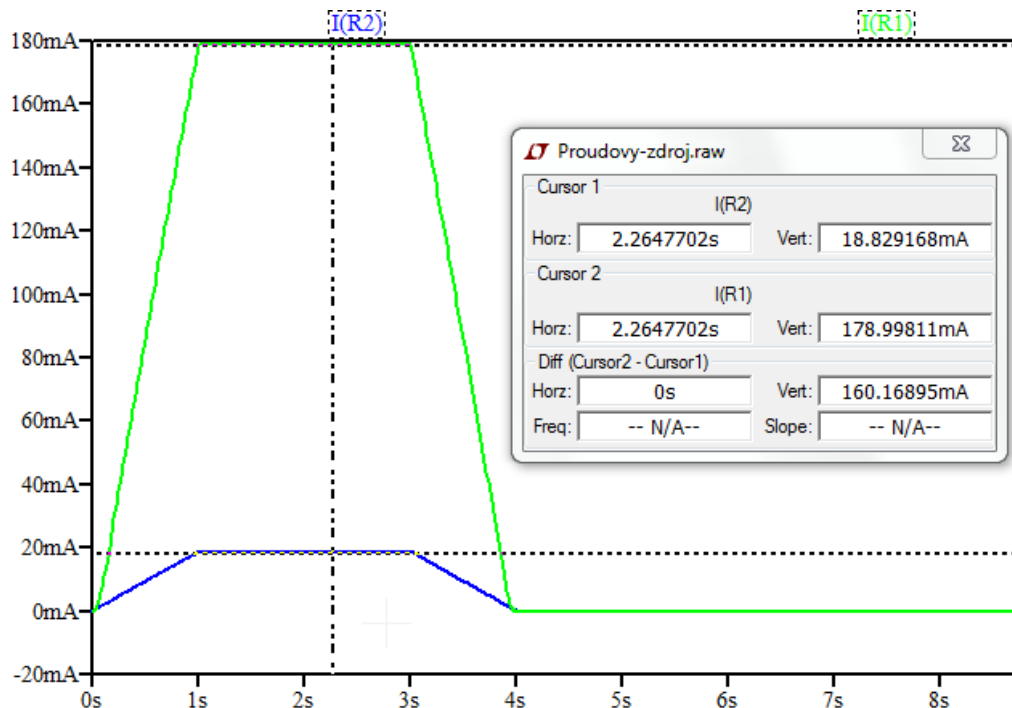
Podle těchto propočtů byly vybrány nejbližší hodnoty rezistorů z řady E24. Hodnota rezistoru po výběru je $R_2 = 47 \Omega$ a $R_1 = 4,3 \Omega$. Zbylé součástky jsou součástí BOM (angl. *Bill of Material*) zvláštní přílohy (vzhledem k velikosti). Pro simulaci byly použity součástky s parametry blízkými námi vybraných součástek a následně vytvořeno a simulováno schéma v prostředí LT Spice.



Obr. 12 – Schéma v prostředí LT Spice

Ověření proudového zesílení

Výsledkem simulace je průběh na obrázku Obr. 13. Lze vysledovat lineární závislost mezi oběma proudy. Ovšem vzhledem k nelineární povaze součástek, zjednodušení při výpočtech a výběru nejbližších rezistoru podle řady E24, jsou výsledné proudy v jiném poměru.



Obr. 13 – Průběhy proudů v obou větvích proudového zrcadla

Po simulaci:

$$I_{LED} \cong 179 \text{ mA}$$

Přepočet proudového zesílení podle nových hodnot rezistorů (viz vzorec 11):

$$A_{i1} \approx \frac{R_2}{R_1} = \frac{47}{4,3} \cong 10,9$$

Skutečné proudové zesílení podle skutečných proudů větvemi (viz vzorec 11):

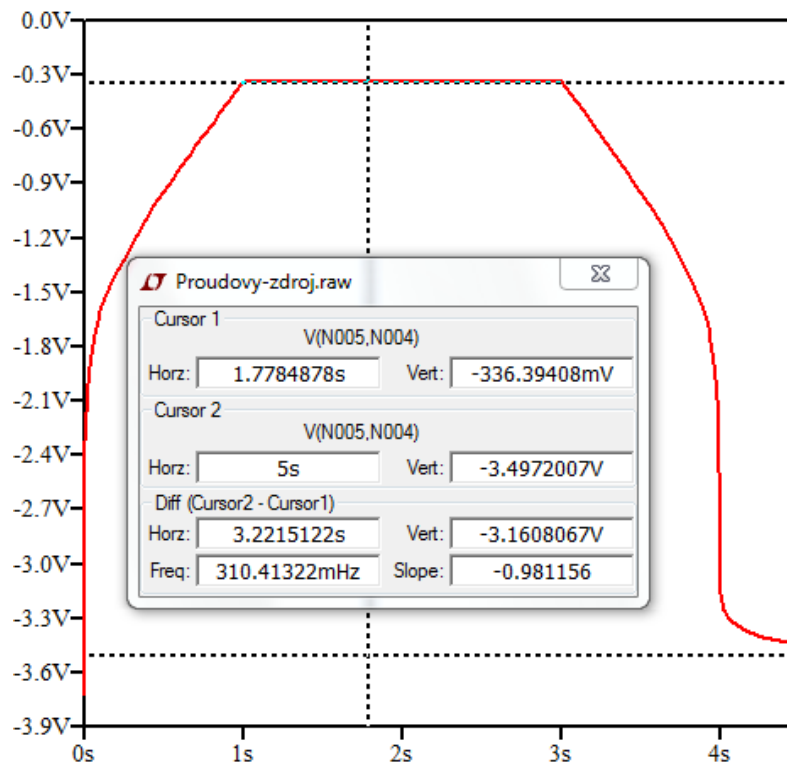
$$A_{i2} = \frac{I_{LED}}{I_{CM}} = \frac{179}{18,8} \cong 9,5$$

Ověření saturace

Ověření, zda nedošlo k saturaci, podléhá podmínce:

- emitorový přechod je polarizován propustně, tj. $U_{EB} > 0$,
- kolektorový přechod je polarizován propustně, tj. $U_{CB} > 0$.

Pruběh na obrázku Obr. 14 ukazuje, jak je polarizován přechod CB na tranzistoru. Podle průběhu je tento přechod tranzistoru polarizován závěrně a nedostává se do saturace. Hodnota napětí při proudu $I_{LED} = 179 \text{ mA}$ dosahuje $U_{CB} = -0,336 \text{ V}$, tj. $U_{CB} < 0$. Tranzistor pracuje v aktivním režimu.



Obr. 14 – Průběh napětí U_{CB} na tranzistoru

Příkony a oteplení součástek proudového zrcadla

Jelikož nejsou stejné napěťové podmínky u červené a zelenomodré LED diody při stejném proudu (viz Tab. 4), bude pro přesnost nutné spočítat rozložení příkonu pro každou barvu zvlášť. Zajímat nás bude zejména část větve, kudy teče proud I_{LED} .

Prvek $R_1 = 4,3\Omega$ má maximální příkon 0,25W. Ověření zda nedošlo k překročení hodnoty je dáno vzorcem:

$$P_{R1} = R_1 \cdot I_{LED}^2 \quad (12)$$

kde: P_{R1} - příkon na rezistoru R_1 [W], I_{LED} - okamžitý proud LED diodou [A], R_1 - hodnota odporu [Ω].

$$P_{R1} = R_1 \cdot I_{LED}^2 = 4,3 \cdot 0,179^2 \cong 0,14 \text{ W}$$

Jelikož není překročen maximální příkon na rezistoru R_1 , proběhla kontrola v pořádku.

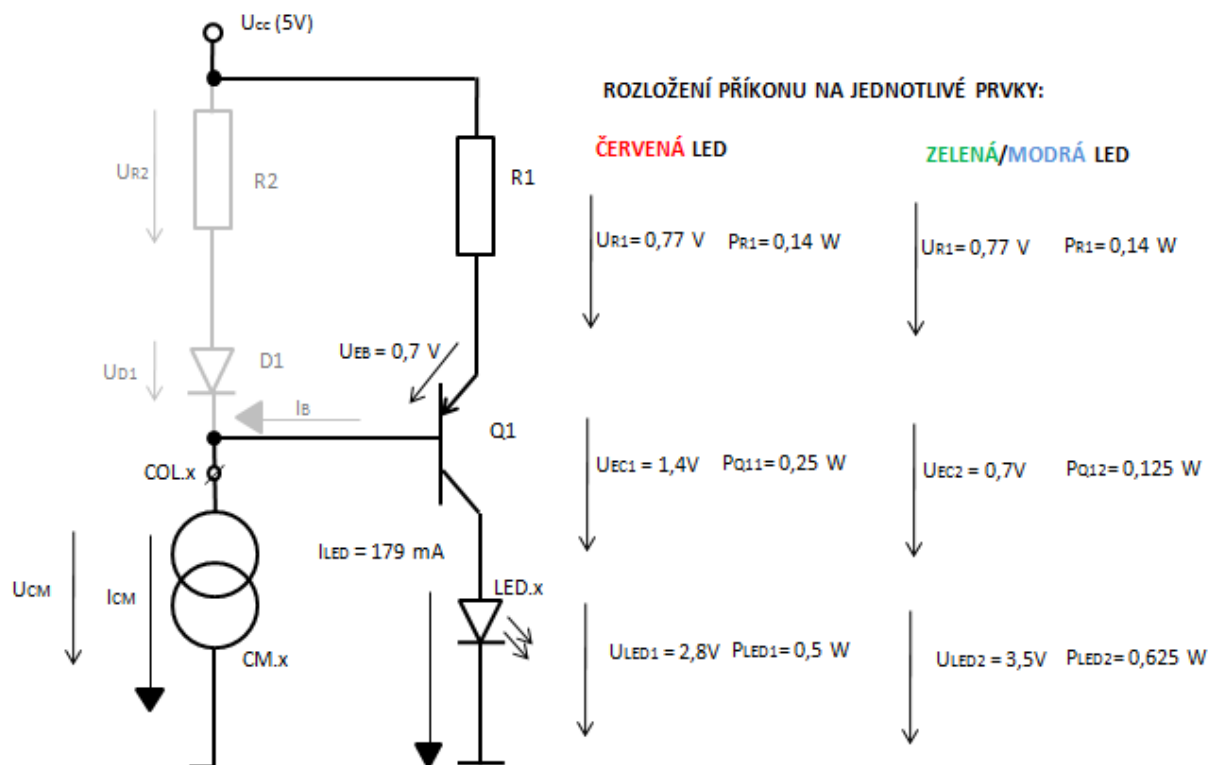
Napětí na prvku R_1 je potom:

$$U_{R1} = R_1 \cdot I_{LED} \quad (13)$$

kde: U_{R1} - napětí na rezistoru R_1 [W], I_{LED} - okamžitý proud LED diodou [A], R_1 - hodnota odporu [Ω].

$$U_{R1} = R_1 \cdot I_{LED} = 4,3 \cdot 0,179 \cong 0,77 \text{ V}$$

Na obrázku níže je uvedeno schéma se všemi typy LED. Respektive dvěma typy – modrá a zelená dioda má podobné chování.



Obr. 15 – Rozložení výkonu v obvodu s červenou LED a v obvodu se zelenou/modrou LED

Chování obvodu s červenou LED

Rozložení napětí ve větvi s LED diodou je:

$$U_{CC} = U_{EC1} + U_{LED1} + U_{R1} \quad (14)$$

kde: U_{CC} - napájecí hladina [V]; $U_{CC} = +5\text{V}$, U_{EC1} - napětí na přechodu EC v zapojení s červenou diodou [V], U_{LED1} - napětí na červené diodě při $I_{LED} = 180 \text{ mA}$ [V]; $U_{LED1} = 2,8\text{V}$, U_{R1} - napětí na rezistoru R_1 [V]; $U_{R1} = 0,77\text{V}$.

Potom můžeme vyjádřit napětí na přechodu EC bipolárního tranzistoru:

$$U_{EC1} = U_{CC} - U_{LED1} - U_{R1} = 5 - 2,8 - 0,77 \approx 1,4\text{V}$$

Maximální ztrátový výkon tranzistoru (po zanedbání bázevého proudu)[11]:

$$P_{Q11} = U_{EC1} \cdot I_{LED} \quad (15)$$

kde: P_{Q11} - ztrátový výkon na tranzistoru [W], U_{EC1} - rezistor ve větvi s tranzistorem [V], I_{LED} - proud tekoucí LED diodou [A].

$$P_{Q11} = U_{EC1} \cdot I_{LED} = 1,4 \cdot 0,179 = 0,25 \text{ W}$$

Na základě výpočtu a taky konstrukce byl vybrán PNP bipolární tranzistor NEXPERIA BCP52-16 s maximální proudem 1A, maximálním ztrátovým výkonem 1W v pouzdře SOT223. Jeho kolektor bude připájen na měděnou plošku o velikosti přibližně 1 cm². Z katalogu platí, že jeho tepelný odpor je $R_{th(j-a)} = 125 \text{ K/W}$.

Výsledné oteplení tranzistoru bude je dáno vzorcem [19]:

$$\Delta t_{Q11} = R_{th(j-a)} \cdot P_{Q11} \quad (16)$$

kde: $R_{th(j-a)}$ - tepelný odpor pouzdro-okolí [K/W], Δt_{Q11} - rozdíl teplot [K], P_{Q11} - ztrátový výkon tranzistoru [W].

Vyjádříme-li oteplení oproti okolí Δt_{Q1} , potom můžeme psát:

$$\Delta t_{Q11} = R_{th(j-a)} \cdot P_{Q11} = 125 \cdot 0,25 \cong 31 \text{ K} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Z hlediska tepelného namáhání, je toto oteplení v pořádku. Výrobce udává maximální teplotu přechodu $T_j = 150^{\circ}\text{C}$. Pro nás by znamenalo, že při pokojové teplotě 25 $^{\circ}\text{C}$ dojde k oteplení přechodu o 56 $^{\circ}\text{C}$.

Okamžitý ztrátový výkon na červené LED diodě:

$$P_{LED1} = U_{LED1} \cdot I_{LED} \quad (17)$$

kde: P_{LED1} - ztrátový výkon na červené LED diodě [W], U_{LED1} - napětí na červené LED diodě [V], I_{LED} - proud tekoucí LED diodou [mA].

$$P_{LED1} = U_{LED1} \cdot I_{LED} = 2,8 \cdot 0,179 \cong 0,5 \text{ W}$$

Výrobce udává maximální ztrátový výkon pro červenou LED 600mW. Samostatné oteplení je počítáno v kapitole, kde se počítá chlazení celé LED matice.

Úbytek napětí na proudovém zrcadle v obvodu s červenou LED je:

$$U_{CM1} = U_{CC} - U_{EB1} - U_{R1} \quad (18)$$

kde: U_{CC} - napájecí hladina [V]; $U_{CC} = +5\text{V}$, U_{CM1} - úbytek napětí na proudovém zrcadle, U_{EB} - napětí na přechodu EB [V]; $U_{EB} \approx 0,7\text{V}$, U_{R1} - napětí na rezistoru R_1 [V]; $U_{R1} = 0,77\text{V}$.

$$U_{CM1} = U_{CC} - U_{EB} - U_{R1} = 5 - 0,7 - 0,77 \cong 3,5\text{V}$$

Maximální ztrátový výkon na proudovém zrcadle v obvodu s červenou LED diodou:

$$P_{CM1} = U_{CM1} \cdot I_{CM} \quad (19)$$

kde: P_{CM1} - ztrátový výkon na proudovém zrcadle [W], U_{CM1} - úbytek napětí na proudovém zrcadle, I_{CM} - proud tekoucí proudovým zrcadlem [A]; $I_{CM} = 0,02A$.

$$P_{CM1} = U_{CM1} \cdot I_{CM} = 3,5 \cdot 0,02 \cong 0,07 \text{ W}$$

Chování obvodu se zelenou/modrou LED

Rozložení napětí ve větvi s LED diodou je:

$$U_{CC} = U_{EC2} + U_{LED2} + U_{R1} \quad (20)$$

kde: U_{CC} - napájecí hladina [V]; $U_{CC} = +5V$, U_{EC2} - napětí na přechodu EC [V], U_{LED2} - napětí na zel./modr. diodě při $I_{LED} = 180 \text{ mA}$ [V]; $U_{LED2} = 3,5 \text{ V}$, U_{R1} - napětí na rezistoru R_1 [V]; $U_{R1} = 0,77V$.

Potom můžeme vyjádřit napětí na přechodu EC bipolárního tranzistoru:

$$U_{EC2} = U_{CC} - U_{LED1} - U_{R1} = 5 - 3,5 - 0,77 \cong 0,7V$$

Maximální ztrátový výkon tranzistoru (po zanedbání bázevého proudu)[11]:

$$P_{Q12} = U_{EC2} \cdot I_{LED} \quad (21)$$

kde: P_{Q12} - ztrátový výkon na tranzistoru [W], U_{EC2} - napětí na přechodu EC [V], I_{LED} - proud tekoucí LED diodou [mA].

$$P_{Q12} = U_{EC2} \cdot I_{LED} = 0,7 \cdot 0,179 = 0,125 \text{ W}$$

Na základě výpočtu a taky konstrukce byl vybrán PNP bipolární tranzistor NEXPERIA BCP52-16 s maximální proudem 1A, maximálním ztrátovým výkonem 1W v pouzdře SOT223. Jeho kolektor bude připájen na měděnou plošku o velikosti přibližně 1 cm^2 . Z katalogu platí, že jeho tepelný odpor je $R_{th(j-a)} = 125 \text{ K/W}$.

Výsledné oteplení tranzistoru bude je dáno vzorcem [19]:

$$\Delta t_{Q12} = R_{th(j-a)} \cdot P_{Q12} \quad (22)$$

kde: $R_{th(j-a)}$ - tepelný odpor pouzdro-okolí [K/W], Δt_{Q12} - rozdíl teplot [K], P_{Q12} - ztrátový výkon tranzistoru [W].

Vyjádříme-li oteplení oproti okolí Δt_{Q12} , potom můžeme psát:

$$\Delta t_{Q12} = R_{th(j-a)} \cdot P_{Q12} = 125 \cdot 0,125 \cong 16 \text{ K} = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Z hlediska tepelného namáhání, je toto oteplení v pořádku. Výrobce udává maximální teplotu přechodu $T_j = 150^{\circ}\text{C}$. Pro nás by znamenalo, že při pokojové teplotě $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dojde k oteplení přechodu o $41 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Okamžitý ztrátový výkon na zelené/modré LED diodě:

$$P_{LED2} = U_{LED2} \cdot I_{LED} \quad (23)$$

kde: P_{LED2} - ztrátový výkon na červené LED diodě [W], U_{LED2} - rezistor ve větvi s tranzistorem [V], I_{LED} - proud tekoucí LED diodou [mA].

$$P_{LED2} = U_{LED2} \cdot I_{LED} = 3,5 \cdot 0,179 \cong 0,625 \text{ W}$$

Výrobce udává maximální ztrátový výkon pro zelenou/modrou LED 800mW. Samostatné oteplení je počítáno v kapitole, kde se počítá chlazení celé LED matice.

Úbytek napětí na proudovém zrcadle v obvodu se zelenou/modrou LED je:

$$U_{CM2} = U_{CC} - U_{EB} - U_{R1} \quad (24)$$

kde: U_{CC} - napájecí hladina [V]; $U_{CC} = +5\text{V}$, U_{CM2} - úbytek napětí na proudovém zrcadle, U_{EB} - napětí na přechodu EB [V]; $U_{EB} \approx 0,7\text{V}$, U_{R1} - napětí na rezistoru R_1 [V]; $U_{R1} = 0,77\text{V}$.

$$U_{CM2} = U_{CC} - U_{EB} - U_{R1} = 5 - 0,7 - 0,77 \cong 3,5\text{V}$$

Maximální ztrátový výkon na proudovém zrcadle v obvodu se zelenou/modrou LED diodou:

$$P_{CM2} = U_{CM2} \cdot I_{CM} \quad (25)$$

kde: P_{CM2} - ztrátový výkon na proudovém zrcadle [W], U_{CM2} - úbytek napětí na proudovém zrcadle, I_{CM} - proud tekoucí proudovým zrcadlem [A]; $I_{CM} = 0,02\text{A}$.

$$P_{CM2} = U_{CM2} \cdot I_{CM} = 3,5 \cdot 0,02 \cong 0,07 \text{ W}$$

Maximální ztrátový výkon obvodu STLED524

Maximální ztrátový výkon obvodu je počítán z úbytku napětí na proudových zdrojích (24 proudových zdrojů, řad) a procházejícím proudem. Nutný předpoklad pro maximální ztrátový výkon je, že obvodem prochází proud všemi proudovými zdroji. Jinými slovy, je žádoucí, aby displej svítil bílou barvou – všechny RGB LED diody svítí maximální svítivostí. Je známo, že ztrátový výkon na proudovém zrcadle je pro všechny diody stejný $P_{CM1} = P_{CM2}$ (na základě výpočtů výše). Potom je ztrátový výkon:

$$P_{DSTLED} = p_r \cdot P_{CM1} \quad (26)$$

kde: P_{DSTLED} - ztrátový výkon obvodu STLED524 [W], p_r - počet řad obvodu STLED524 [-], P_{CM1} - ztrátový výkon na jednom zdroji proudu [W].

$$P_{DSTLED} = p_r \cdot P_{CM1} = 24 \cdot 0,07 = 1,68 \text{ W}$$

Což by znamenalo, že při tepelném odporu mezi přechodem a okolím obvodu STLED524 $R_{thJA} = 62 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ by bylo oteplení obvodu oproti okolí:

$$\Delta T = R_{thJA} \cdot P_{DSTLED} \quad (27)$$

kde: P_{DSTLED} - ztrátový výkon obvodu STLED524 [W], ΔT - rozdíl teplot pouzdro-okolí obvodu STLED524 [$^{\circ}\text{C}$], R_{thJA} - tepelný odpor pouzdro-okolí obvodu STLED524 [$^{\circ}\text{C/W}$].

$$\Delta T = R_{thJA} \cdot P_{DSTLED} = 62 \cdot 1,68 \cong 104 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tato hodnota je již za hranici, kdy by se mohl obvod provozovat na maximální výkon při pokojové teplotě. Maximální teplotu přechodu výrobce udává $T_J = +125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ při v rozsahu hodnot okolí od -30 do $+85 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ovšem displej se nebude provozovat za těchto podmínek, kdy bychom vyžadovali rozsvícení všech LED diod.

Skutečné příkony a oteplení součástek

Skutečné příkony a oteplení součástek se odvíjejí od funkcí, které budou provozovány. Předpoklad pro tyto výpočty je fakt, že bude využito tří základních funkcí – obrysové světlo, směrové světlo a brzdové světlo. To znamená, že pro obrysové světlo bude svítit 1/3 displeje (červeně), pro brzdové světlo rovněž 1/3 displeje (červeně) a pro směrové světlo také 1/3 displeje (kombinovaně). Pro kombinování barev se budou jednotlivé složky míchat tak aby nebyl překročen příkon 1/3 maxima. V konečné fázi vždy dostaneme ať mícháním, nebo

svícením jednou barvou vždy stejnou svítivost. Toto je předpoklad a proto můžeme počítat maximální skutečné příkony buď složitěji (mícháním), nebo jednodušeji, s použitím jedné barvy – červená – pro celý displej.

V tomto případě jsou příkony součástek srovnatelné s předchozí statí, kde se počítaly pro červenou LED diodu. Ovšem příkony a oteplení obvodu STLED524 již budou jiné, jelikož se dosahujeme 1/3 maximálního příkonu. Potom je ztrátový výkon:

$$P_{D_{ST1/3}} = p_{f1/3} \cdot P_{CM1} \quad (28)$$

kde: $P_{D_{ST1/3}}$ - ztrátový výkon obvodu STLED524 [W], $p_{f1/3}$ - celkový maximální proud procházející všemi zdroji proudu STLED524 [-], P_{CM1} - ztrátový výkon na jednom zdroji proudu [W].

$$P_{D_{ST1/3}} = p_f \cdot P_{CM1} = 8 \cdot 0,07 = 0,56W$$

Což by znamenalo, že při tepelném odporu mezi přechodem a okolím obvodu STLED524 $R_{thJA} = 62 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ by bylo oteplení obvodu oproti okolí:

$$\Delta T_{1/3} = R_{thJA} \cdot P_{D_{ST1/3}} \quad (29)$$

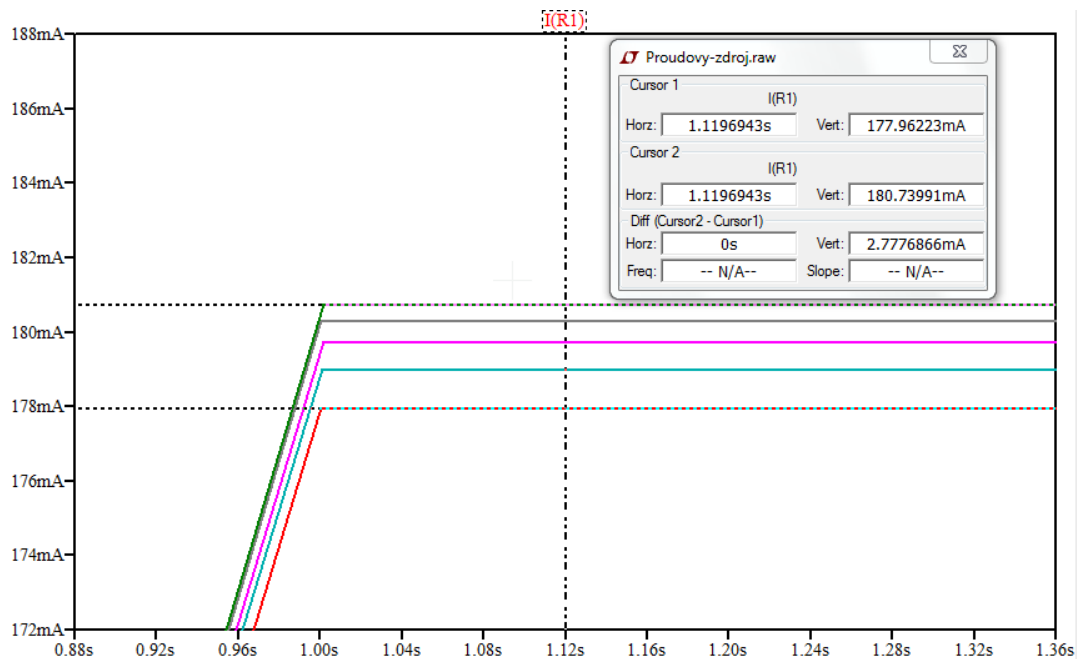
kde: $P_{D_{ST1/3}}$ - ztrátový výkon obvodu STLED524 [W], $\Delta T_{1/3}$ - rozdíl teplot pouzdro-okolí obvodu STLED524 [$^\circ\text{C}$], R_{thJA} - tepelný odpor pouzdro-okolí obvodu STLED524 [$^\circ\text{C/W}$].

$$\Delta T_{1/3} = R_{thJA} \cdot P_{D_{ST1/3}} = 62 \cdot 0,56 \cong 35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Závislost proudu na teplotě

Na základě v jakých podmínkách obvod pracuje, se může jeho chování zhoršovat či dokonce neočekávaně vybočovat mimo jeho navrhovaný rámec fungování. Chování obvodu je ovlivněno zejména okolní teplotou. V prostředí LT Spice je možné sledovat a simulovat závislost určitého parametru (např.: proudu) na různé teplotě okolí. Ta je prováděna příkazem: *.step temp x y z*, kde *x* představuje počáteční hodnotu, *y* konečnou hodnotu, *z* představuje krok navýšení.

Námi nastavený příkaz zahrnuje teploty 0 $^\circ\text{C}$, 25 $^\circ\text{C}$, 50 $^\circ\text{C}$, 75 $^\circ\text{C}$ a 100 $^\circ\text{C}$. Na obrázku *Obr. 16* je průběh, kde červená čára představuje proud I_{LED} při teplotě 0 $^\circ\text{C}$. Zelená čára představuje proud I_{LED} při teplotě 100 $^\circ\text{C}$. Světle modrá čára představuje proud I_{LED} při teplotě 25 $^\circ\text{C}$, při níž byly prováděny výše zmíněné simulace, tj. pokojová teplota.



Obr. 16 – Chování obvodu při rozdílných teplotách okolí

Rozdíl proudu je zanedbatelný. Z výše zmíněného obrázku dosahuje odklon od nastaveného proudu (při 25 °C) v maximálně jednotkách mA.

Rozdíl proudů při oteplení:

$$\Delta I_{LED+} = |I_{LED(100^{\circ}C)} - I_{LED(25^{\circ}C)}| \quad (30)$$

kde: ΔI_{LED+} - rozdíl proudů při oteplení [mA], $I_{LED(100^{\circ}C)}$ - proud LED při teplotě okolí 100°C [mA], $I_{LED(25^{\circ}C)}$ - proud LED při teplotě okolí 25°C [mA].

$$\Delta I_{LED+} = |I_{LED(100^{\circ}C)} - I_{LED(25^{\circ}C)}| = |180,74 - 179| = 1,74 \text{ mA}$$

Vyjádřeno v procentech:

$$\frac{\Delta I_{LED+}}{I_{LED(25^{\circ}C)}} \cdot 100 = \frac{1,74}{179} \cdot 100 = 0,97 \%$$

Rozdíl proudů při ochlazení:

$$\Delta I_{LED-} = |I_{LED(0^{\circ}C)} - I_{LED(25^{\circ}C)}| [1 \text{ mA}] \quad (31)$$

kde: ΔI_{LED-} - rozdíl proudů při ochlazení [mA], $I_{LED(0^{\circ}C)}$ - proud LED při teplotě okolí 0°C [mA], $I_{LED(25^{\circ}C)}$ - proud LED při teplotě okolí 25°C [mA].

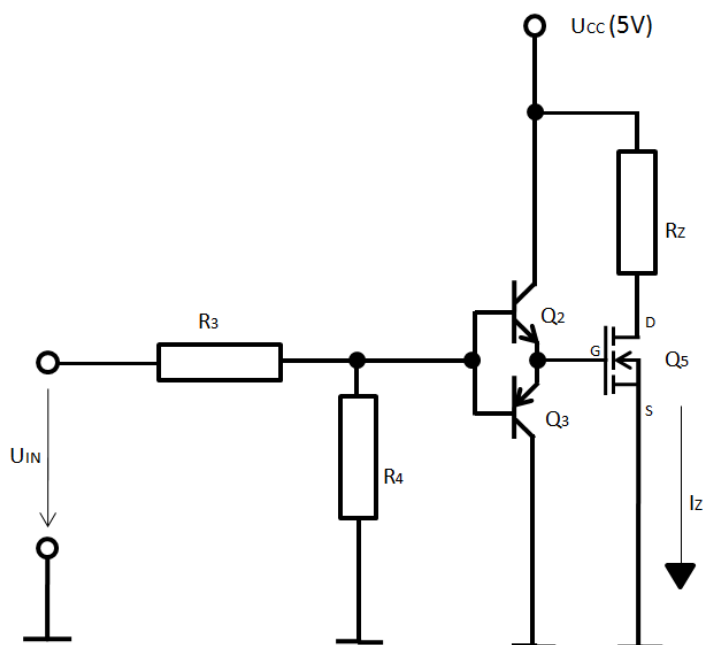
$$\Delta I_{LED-} = |I_{LED(0^{\circ}C)} - I_{LED(25^{\circ}C)}| = |178 - 179| = 1 \text{ mA}$$

Vyjádřeno v procentech:

$$\frac{\Delta I_{LED-}}{I_{LED(25^{\circ}C)}} \cdot 100 = \frac{1}{179} \cdot 100 = 0,56 \%$$

Výběr spínací součástky

Jako spínací součástka zde bude sloužit N-MOSFET s indukovaným kanálem. Značnou výhodou FET tranzistoru je, že mají vysokou vstupní impedanci a tudíž nízký vstupní proud hradla – jsou ovládány napětím. Jejich nevýhodou je kapacita hradla, kterou je třeba redukovat zvláště ve spínacím režimu, kdy čekáme velmi rychlé otevření, či velmi rychlé zavření tranzistoru [12]. Pro tento účel se v praxi často používá zapojení bipolárních tranzistoru (NPN a PNP) v tzv. totemu (komplementární dvojce), jež umožňují právě rychlé nabití a vybití hradla MOSFETu a tím i jeho otevření či zavření.

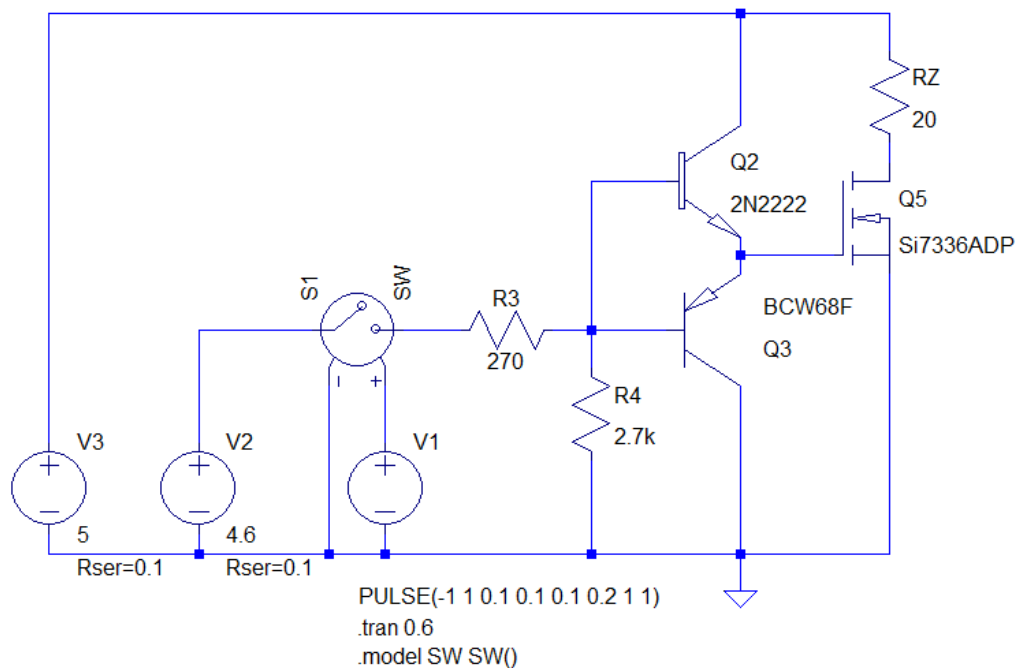


Obr. 17 – MOSFET jako spínač s řídicím totemem

Na obrázku je nahrazena LED dioda rezistorem R_Z . Proud prochází zátěží, je-li přivedeno kladné napětí U_{IN} na svorky – přes napěťový dělič R_3 a R_4 se napětí dostává k bipolárním tranzistorům – tranzistor se otevírá. V případě, že se na hradle (pin G) objevuje záporný náboj, otevře se tranzistor Q_2 a dojde k vyrovnání potenciálů na hodnotu U_{CC} . Hodnota odporu R_{DS} na přechodu D a S dosahuje desítky až stovky $m\Omega$ a tedy je zde jen velmi malý úbytek napětí na tomto přechodu. Není – li přivedeno kladné napětí U_{IN} nebo není-li přivedeno žádné napětí, tranzistor MOSFET je uzavřený a proud zátěží neprochází. Přes rezistor R_4 se dostává

nulový potenciál k tranzistoru Q₃ a je-li na hradle (pin G) kladný náboj, dojde k otevření tranzistoru Q₃ a svedení náboje k zemi – uzavření MOSFETu.

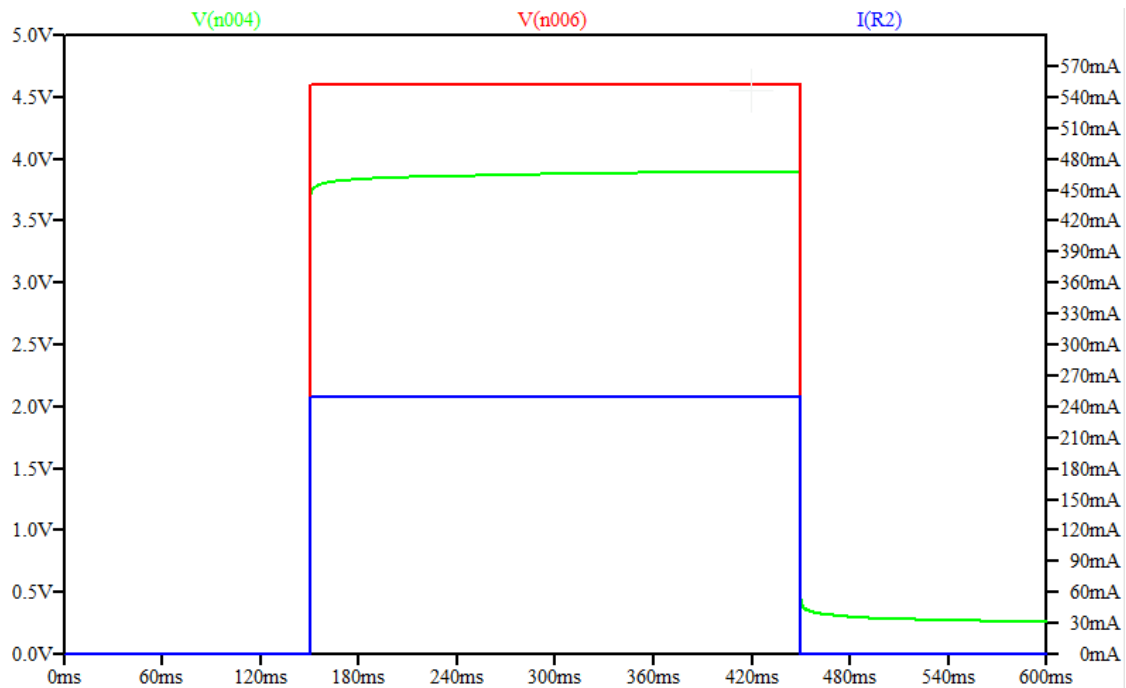
Na obrázku níže se nachází zapojení MOSFETu jako spínač v programu LT Spice. Byly vybrány konkrétní hodnoty rezistorů R₃ a R₄ s ohledem na to, aby byl poměr hodnot 1:10 a také, aby se R₄ nacházel, v rozmezí od 1 kΩ do 10 kΩ. Dochází také k snížení proudů bázemi tranzistorů.



Obr. 18 – Zapojení MOSFETu v programu LT Spice

Simulace zapojení MOSFETu jako spínač

Simulace na obrázku Obr. 19 ukazuje, že MOSFET jako spínač má požadované chování. Nenastává zpoždění mezi řídicím signálem a průchodem proudu tranzistoru MOSFET. Při návrhu DPS bude nutné dbát, aby byl co nejblíže k svorkám bipolárních tranzistoru umístěn keramický kondenzátor jako zdroj okamžité energie při otevírání tranzistoru. Napětovým děličem je potlačen příliš vysoký proud bázemi bipolárních tranzistorů.



Obr. 19 – Průběh řídicího napětí U_{IN} (červeně), proudu zátěží R_Z (modře) a průběh napětí na hradle (zeleně)

Pokud bude svítit všech 24 řad (24 LED diod ve sloupci), bude přes přechod tranzistoru DS procházet okamžitý proud I_Z [mA]. Byl vybrán MOSFET INFINEON IRLML6344TRPBF s odporem v sepnutém stavu $R_{DS} = 37 \text{ m}\Omega$ v pouzdře SOT-23 s maximálním spojitým proudem 5A.

Maximální okamžitý proud prvkem:

$$I_Z = K_f \cdot I_{LED} \quad (32)$$

kde: K_f - počet sepnutých řad obvodu STLED524 [-], I_Z - celkový okamžitý proud obvodu STLED524 [mA], I_{LED} - proud LED diodou [mA].

$$I_Z = K_f \cdot I_{LED} = 24 \cdot 179 = 4,32 \text{ A}$$

Maximální okamžitý ztrátový výkon:

$$P_{ZFET} = R_{DS} \cdot I_Z^2 \quad (33)$$

kde: P_{ZFET} - maximální okamžitý ztrátový výkon na tranzistoru MOSFET [W], I_Z - celkový okamžitý proud obvodu STLED524 [mA], R_{DS} - odpor MOSFETu v sepnutém stavu [Ω].

$$P_{ZFET} = R_{DS} \cdot I_Z^2 = 0,037 \cdot 4,32^2 \cong 0,69 \text{ W}$$

Maximální střední ztrátový výkon:

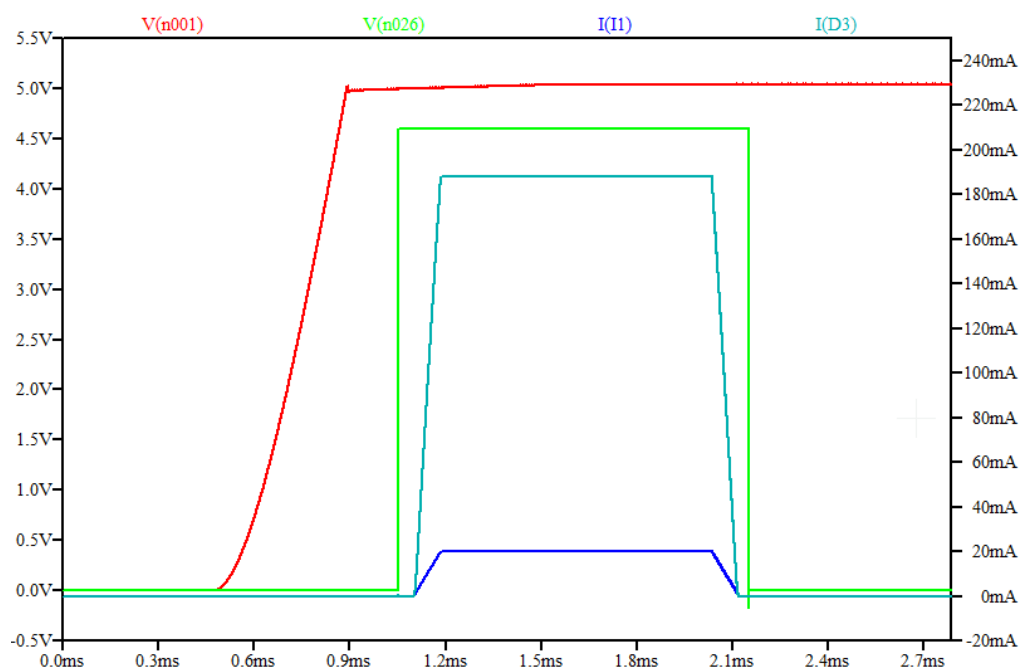
$$P_{Zstřed} = R_{DS} \cdot I_Z^2 \cdot S \quad (34)$$

kde: $P_{Zstřed}$ - maximální střední ztrátový výkon na tranzistoru MOSFET [W], I_Z - celkový okamžitý proud obvodu STLED524 [mA], R_{DS} - odpor MOSFETu v sepnutém stavu [Ω], S - střída multiplexu matice [-].

$$P_{Zstřed} = R_{DS} \cdot I_Z^2 \cdot S = 0,037 \cdot 4,32^2 \cdot \frac{1}{5} \cong 0,14 \text{ W}$$

Kompletní zapojení

Chování kompletního schématu zapojení je na *Obr. 20*. Po zapnutí obvodu LT3741 jsou na tomto obrázku vystiženy průběhy napětí a proudů proudového zrcadla (posilovacího zdroje proudu), spínací napětí MOSFETu a proud LED diodou. Kompletní schéma se zde nevejde, a proto je součástí přílohy B.



Obr. 20 – Průběhy napětí a proudu kompletního zapojení – náběh napětí po zapnutí LT3741 (červeně), spínání MOSFETU (zeleně), proud LED diodou (světle modře) a proud proudovým zdrojem obvodu STLED524 (tmavě modře)

Toleranční analýza

Tento druh analýzy má za cíl zjistit, co se děje s obvodem, jestliže jeho součástky dosahují krajností tolerancí. Tedy jestli nadále bude obvod schopen vykonávat požadovanou funkci, zda je robustní. V našem případě to bude znamenat, jestli bude protékat proud LED diodou a jak se jeho hodnota bude měnit. Vyjdeme z předpokladu, že obvod obsluhující MOSFET bude

jen málo, či vůbec způsobovat zhoršení vlastností spínání a proto se upře tato analýza na obvod zdroje proudu – proudové zrcadlo. Tato analýza se zde vztahuje na tolerance rezistoru R_1 a R_2 (viz *Obr. 21*). Tolerance obou rezistorů jsou $\Delta R = \pm 5 \%$.

Proud dosahuje největších extrémů při kombinacích, kdy R_1 a R_2 dosahují hodnoty odporu s navzájem opačnými hodnotami tolerancí (viz. *Obr. 22*). Pro případ, kdy hodnota $R_2 = 47\Omega +5\%$ a $R_1 = 4,3\Omega -5\%$ se proud LED diodou zvětšuje, tj. $I_{LEDmax} = 193,2 \text{ mA}$. V případě, kdy hodnota $R_2 = 47\Omega -5\%$ a $R_1 = 4,3\Omega +5\%$ se proud LED diodou zmenšuje, tj. $I_{LEDmin} = 163,1 \text{ mA}$.

Pásmo, ve kterém se proud LED diodou může pohybovat:

$$\Delta I_T = |I_{LEDmax} - I_{LEDmin}| \quad (35)$$

kde: ΔI_T - možné pásmo pohybu proudu na základě tolerancí [mA], I_{LEDmax} - maximální proud daný tolerancemi rezistorů [mA], I_{LEDmin} - minimální proud daný tolerancemi rezistorů [mA].

$$\Delta I_{LED} = |I_{LEDmax} - I_{LEDmin}| = |193,2 - 163,1| = 30,1 \text{ mA}$$

Rozdíl proudů mezi zvoleným proudem a při horní mezi proudu:

$$\Delta I_{T1} = |I_{LED} - I_{LEDmax}| \quad (36)$$

kde: ΔI_{T1} - možné pásmo pohybu proudu na základě tolerancí – horní mez [mA], I_{LEDmax} - maximální proud daný tolerancemi rezistorů [mA], I_{LED} - zvolený proud LED diodou [mA]; $I_{LED} = 179 \text{ mA}$.

$$\Delta I_{T1} = |I_{LED} - I_{LEDmax}| = |179 - 193,2| = 13,2 \text{ mA}$$

Vyjádřeno v procentech:

$$\frac{\Delta I_{T1}}{I_{LED}} \cdot 100 = \frac{13,2}{179} \cdot 100 \cong 7,4 \%$$

Rozdíl proudů mezi zvoleným proudem a při dolní mezi proudu:

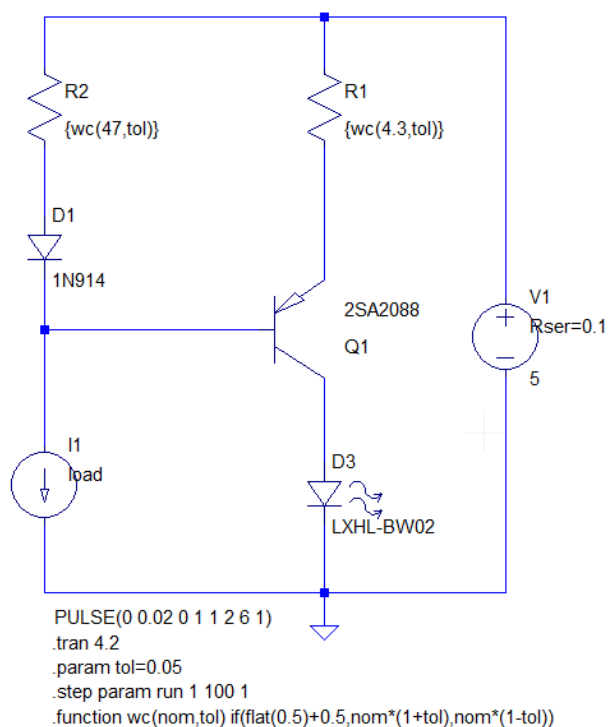
$$\Delta I_{T2} = |I_{LED} - I_{LEDmin}| \quad (37)$$

kde: ΔI_{T2} - možné pásmo pohybu proudu na základě tolerancí – dolní mez [mA], I_{LEDmin} - minimální proud daný tolerancemi rezistorů [mA], I_{LED} - zvolený proud LED diodou [mA]; $I_{LED} = 179 \text{ mA}$.

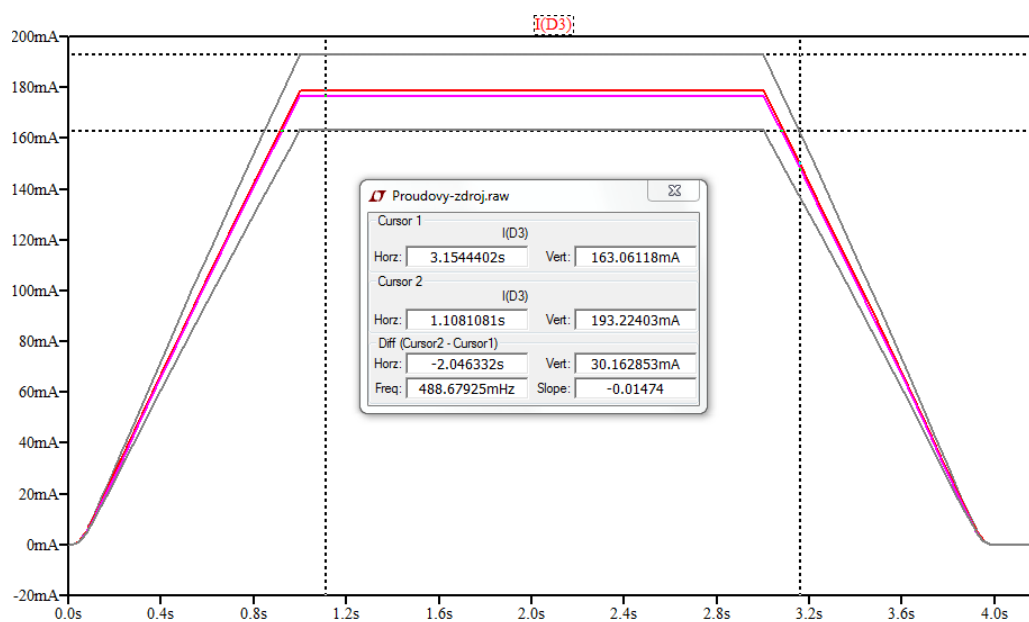
$$\Delta I_{LED} = |I_{LEDmax} - I_{LEDmin}| = |193,2 - 163,1| = 30,1 \text{ mA}$$

Vyjádřeno v procentech:

$$\frac{\Delta I_{T2}}{I_{LED}} \cdot 100 = \frac{15,9}{179} \cdot 100 \cong 8,9 \%$$



Obr. 21 – Schéma pro simulování toleranční analýzy



Obr. 22 – Průběhy prou I_{LED} při různé hodnoty tolerancí rezistorů; šedě jsou naznačeny extrémní případy proudu LED diodou

2.3 Zdroj napětí

Celé zapojení vyžaduje jednu napěťovou hladinu a to sice $U_{CC} = 5 \text{ V}$. Jako zdroj napětí by měl sloužit DC-DC (step-down) snižující měnič. Vybírán by měl být s ohledem na široký vstupní napájecí rozsah, požadovanou hladinu napětí, účinnost, maximální spínací proud a možnost externí synchronizace.

Požadavky spojené s maximálním odběrem proudu:

Chceme-li rozsvítit všechny LED diody, je potřeba dodat dostatečný výkon, tedy i proud pro všechny prvky, které se skládají z 8mi modulů.

$$I_{MAX1} = p_M \cdot (I_{STLED} + p_{LED} \cdot I_{LED}) \quad (38)$$

kde: I_{MAX1} - maximální odebíraný proud [mA], p_{LED} - počet LED diod ve sloupci [-], p_M - počet modulů [-], I_{STLED} - maximální proud odebíraný obvodem STLED524 [mA], I_{LED} - zvolený proud LED diodou [mA]; $I_{LED} = 179 \text{ mA}$.

$$I_{MAX1} = 8 \cdot (480 + 24 \cdot 179) \cong 38400 \text{ mA} = 38,4 \text{ A}$$

Požadavky spojené se skutečným odběrem proudu:

Prakticky nebude provozována pro plné rozsvícení LED diod. Vždy se využije část displeje k rozsvícení dané funkce. Pokud vezmeme v potaz, že každá funkce bude mít 1/3 displeje k rozsvícení - pro funkci stop a obrysové světlo se využije pouze červená barva a pro směrové kombinace červené a zelené. Pokud budeme chtít barvy míchat, tak vždy tak, aby nebyl překročen rámec svítivosti – tzn., že při míchání oranžové by nemělo dojít při součtu středních proudů LED diodami k překročení proudu I_{LED} – např.: poměrem středních proudů 50:50, či 40:60, atp. Tedy obvody budou provozovány na 1/3 maximálního příkonu. Potom můžeme psát:

$$I_{MAX2} = p_M \cdot I_{STLED} + d_{tf} \cdot p_f \cdot p_c \cdot I_{LED} \cdot S \quad (39)$$

kde: I_{MAX2} - maximální odebíraný proud [mA], p_c - počet LED čipů [-], p_M - počet modulů [-], p_f - počet funkcí [-], I_{STLED} - maximální proud odebíraný obvodem STLED524 [mA], I_{LED} - zvolený proud LED diodou [mA]; $I_{LED} = 179 \text{ mA}$, d_{tf} - konstanta pro svícení 1/3 displeje [-], S - střída multiplexu matice [-].

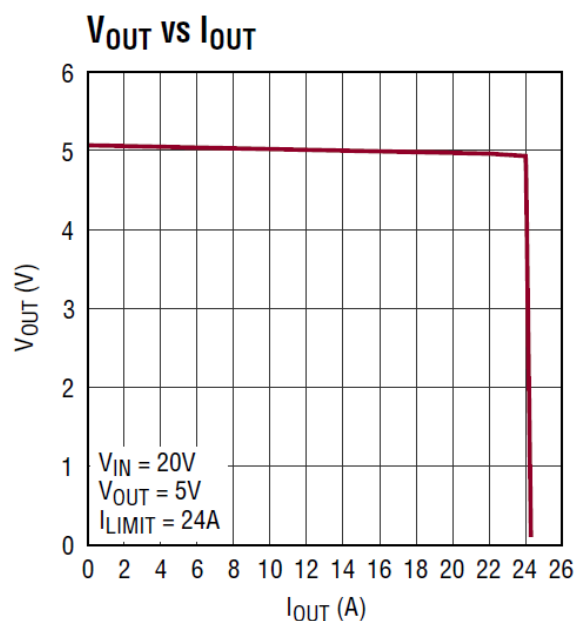
$$I_{MAX2} = 8 \cdot 480 + \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot 320 \cdot 179 \cdot \frac{1}{5} \cong 15300 \text{ mA} = 15,3 \text{ A}$$

Na základě těchto výpočtu byl vybrán obvod LT3741 od společnosti LINEAR TECHNOLOGY, jehož vlastnosti se dají shrnout, viz tabulka Tab. 6.

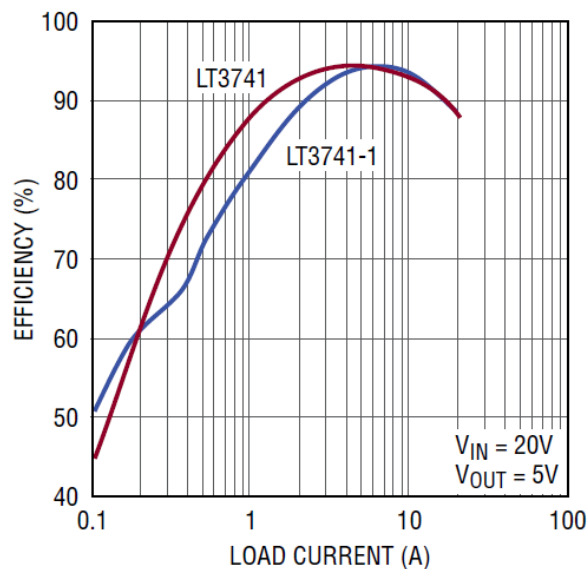
Tab. 6 – Základní vlastnosti obvodu LT3741

Vlastnost	Hodnota
Rozsah vstupního napětí	6 – 36 V
Rozsah výstupního napětí	0 – 34 V
Přesnost výstupního napětí	±1,5 %
Maximální proud	20 A (24 A mimo danou přesnost)
Přesnost výstupního proud	± 6 %
Účinnost	Až 92 %
Nastavitelný pracovní kmitočet	200 – 1000 kHz

Bude využit pouze jeden obvod. Sice dojde k poddimenzování z pohledu maximálního příkonu, ale z druhé strany, nebude využit plný potenciál displeje. Takovéto zapojení je dostatečné pro námi zvolené funkce displeje, které se mají zobrazovat. Podle doporučeného zapojení od výrobce a správného nastavení dělicího poměru pro zpětnovazební měření napětí a zpětnovazební nastavení proudu přes měřicí rezistor vychází statická zatěžovací charakteristika obvodu LT3741 viz Obr. 23.



Obr. 23 – Statická zatěžovací charakteristika DC-DC měniče[13]



Obr. 24 – Závislost účinnosti na odebíraném proudu[13]

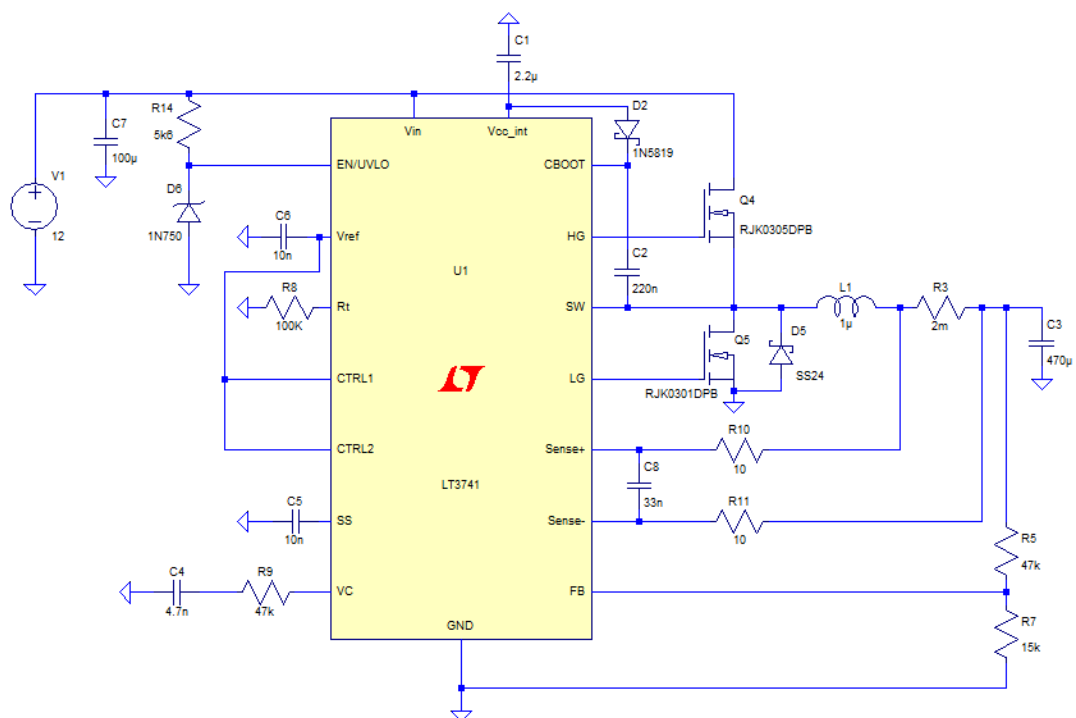
Jestliže, bude proudový odběr $I_{MAX} = 15,3 \text{ A}$, potom můžeme z grafu na Obr. 24 odečíst hodnotu účinnosti, která je $\eta \approx 0,88$. Z toho plyne, že by příkon měl být:

$$P_0 = \frac{P_Z}{\eta} = \frac{U \cdot I_{MAX}}{\eta} \quad (40)$$

kde: P_Z - ztrátový výkon zapojení [mW], P_0 - příkon [mW], I_{MAX} - maximální odebíraný proud [mA], U - napěťová hladina [V], η - účinnost zdroje[-].

$$P_0 = \frac{P_Z}{\eta} = \frac{U \cdot I_{MAX}}{\eta} = \frac{5 \cdot 15,3}{0,88} \approx 87000 \text{ mW} = 87 \text{ W}$$

Jak již bylo, zmíněno jedná se o obvod DC-DC snižujícího (step-down) měniče. Pro jeho realizaci spínání je použita cívka o velikosti $1\mu\text{H}$ a dva tranzistory MOSFET. Zbylé součástky jsou k dispozici ve zvláštní příloze (vzhledem k velikosti) jako součást BOM (angl. *Bill of Material*). Detail zapojení je na Obr. 25. Výhodou využití tohoto obvodu je možnost využít simulace v programu LT Spice od tohoto výrobce, kde se obvod nachází v knihovně.



Obr. 25 – Detail zapojení DC-DC měniče LT3741

3 Praktická realizace

Návrh desek plošných spojů probíhal v programu Eagle 7.6.0 v zásadě ve dvou fázích. Jelikož je zde velký nárok na rozmístění velkého množství součástek, je celé zapojení fyzicky rozděleno na dvě části: na desku s LED diodami (LED modul) a na desku s řídicími obvody, budícími obvody a DC-DC měničem (Řídicí modul). Základní vlastnosti desek jsou uvedeny v Tab. 7. Výrobce, kterému byla zadána výroba, byl PragoBoard s.r.o. a osazení bylo zadáno firmě SAFIRAL s.r.o. Veškeré soubory vytvořené v tomto programu jsou součástí zvláštní přílohy.

Tab. 7 – Základní vlastnosti obou DPS

	LED modul	Řídicí modul
Rozměry	220x220 mm	330x220 mm
Počet vrstev	2	4
Tloušťka desky	1,5 mm	1,2 mm
Tloušťka měděné fólie	35 μ m	35 μ m
Třída přesnosti [14]	4	6
Typ desky	FR4	FR4

3.1 LED modul

Jde o jednodušší z obou DPS. Deska, co se týče součástek, obsahuje pouze LED čipy a konektory, jež přes kabeláž spojují obě desky. Na desce se nachází celkově 320 LED čipů a 8 konektorů. Velmi zásadní je u této desky pravidelné rozmístění LED čipů s přesně danou roztečí jak ve vertikálním, tak i horizontálním směru – ta je 8,5 mm od středu diody. Tím je dán kompromis mezi hustotou osazení a nutnou mezerou pro vedení vodivých cest. Rozměry plochy, kterou takto pokrývají LED čipy je 140 x 195 mm. Jelikož, je schéma příliš veliké, je součástí zvláštní přílohy. Detail DPS je součástí přílohy C v měřítku 4:5.

Oteplení vodičů

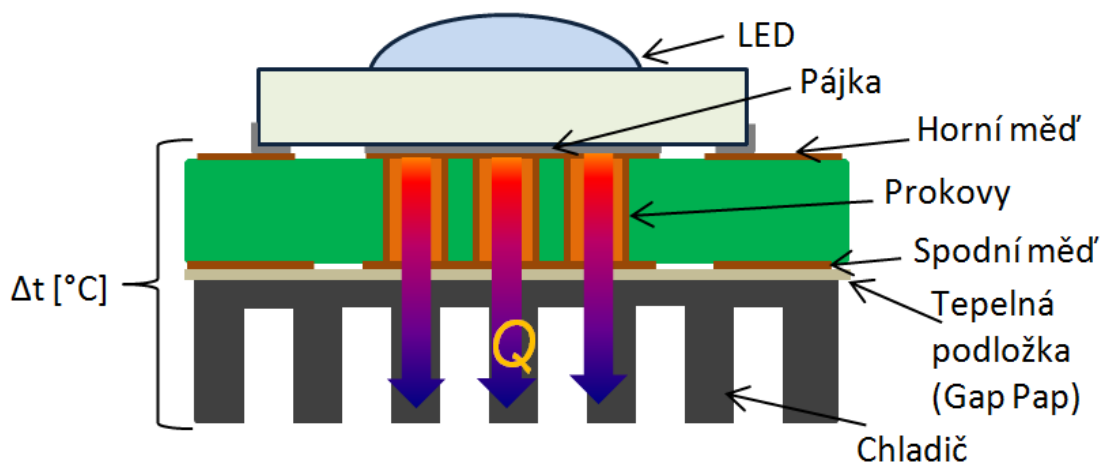
Na této desce se nacházejí dva typy šíře vodivých cest, o rozměrech 0,3 mm a 0,6 mm. Cesta o tloušťce 0,3 mm teče maximální spojitý proud 180 mA (cesta od anody LED diody k řídicímu obvodu). Cestou o tloušťce 0,6 mm teče maximální proud 4,32 A po dobu 1/5 periody a proto jeho střední hodnota je 0,86A. Tento vodič spojuje katody diod daného sloupce.

Pokud z grafu na *Obr. 40* (příloha E) odečteme, o kolik se oteplí oproti okolí cesta s šířkou 0,3 mm, tak je to $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro cestu s šířkou 0,6 mm je to oteplení oproti okolí $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Chlazení LED diody

Jakákoliv LED dioda kromě světla emituje také teplo (sáláním, popř. vedením). Vždy záleží, zda je nutné chladit, či nikoliv. U LED diod s nízkou svítivostí, často tato problematika odpadá a chlazení probíhá výměnou tepla mezi okolím a pouzdem přirozeně. Čím vyšší svítivý výkon od diody čekáme, tím bude nutné více počítat s tím, že se dioda bude muset chladit.

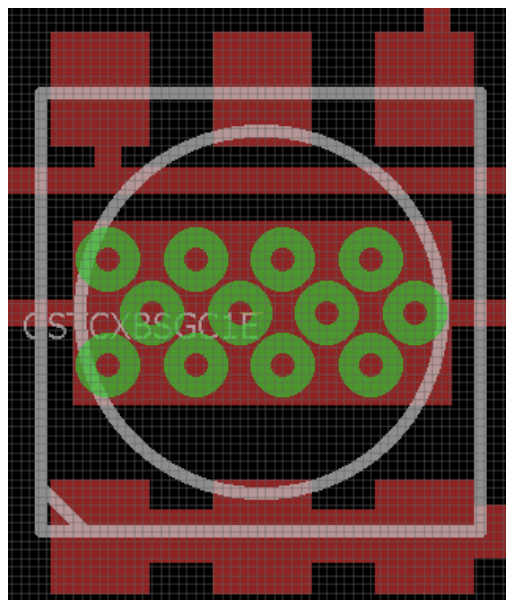
U LED diod se asi 70% výkonu přeměňuje v teplo Q [7][16]. To je odváděno z opačné strany, než dioda emituje světlo, viz *Obr. 26*.



Obr. 26 – Odvod tepla z pouzdra LED diody

Pro odvod tepla v našem případě, bude sloužit chladičí ploška na spodní straně LED diody – tímto je odváděno teplo z PN přechodu. Dále se teplo bude dostávat přes pájku, horní měď, prokovy, spodní měď, tepelná podložka (angl. *Gap Pad*) a chladič do okolí. Na celkovém tepelném odporu hrají největší roli tepelné odpory přechodu, prokovů, vodivé fólie a chladiče. Proto, v dalších výpočtech budou zbylé tepelné odpory zanedbány.

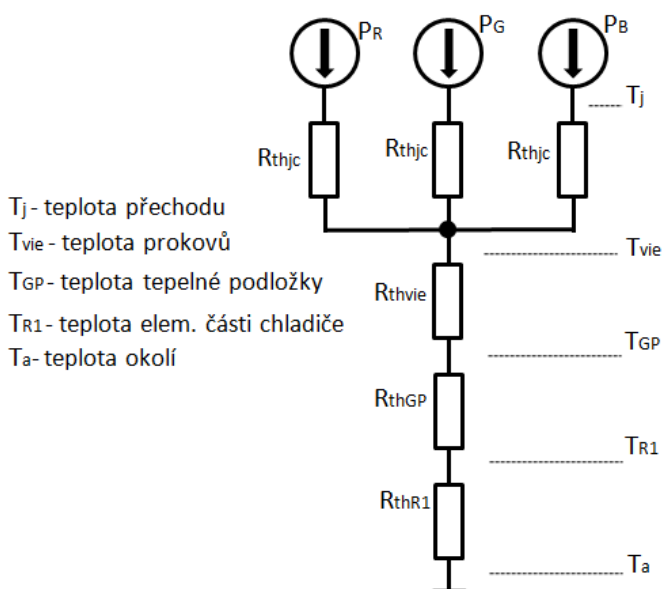
Návrh DPS uvažuje s umístěním většího množství prokovů pod LED diodou za účelem lepšího odvodu tepla. Podle doporučené velikosti plošky pod diodou (angl. *heat sink*) [8] a minimálním průměrem vrtání, tj. $d = 0,3\text{ mm}$, je množství těchto prokovů stanoveno na 12, viz *Obr. 27*. Pokud bychom vyžadovali vyšší hustotu prokovů – vyšší plocha pro odvod tepla v kolmém směru – museli bychom mít jemnější vrtání. To ovšem značně zvyšuje cenu při výrobě DPS.



Obr. 27- Rozložení prokův pod LED

LED čip od výrobce Opto Supply se vyznačuje maximální teplotou přechodu $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ a operační teplotou od -30 do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jelikož, zde chybí parametry tepelného odporu mezi PN přechodem a pouzdem $R_{thjc} = 60\text{ K/W}$, bude pro tyto účely zvolena LED s podobnými vlastnostmi od výrobce OSRAM, model LA G6SP [18].

Pro účely stanovení maximálního oteplení je vhodné si nejprve navrhnu schéma tepelného obvodu, viz Obr. 28. Díky tomuto schématu bude možné obezřetněji počítat s nárůstkem teploty a teplotními odpory.



Obr. 28 – Schéma tepelného obvodu

Výpočet výkonu LED čipu:

Z obrázku *Obr. 28* je patrné, že v oteplení hraje velkou roli ztrátový výkon. Proto bude nejprve nutné stanovit, jaký výkon se přenesení přes tepelné odpory. Každá z LED v matici může samostatně svítit, nebo všechny. Je známo, že bude využita jen kombinace barev červená a zelená, nebo zcela červená. Proto má význam spočítat jen tyto námi stanovené kombinace. V zásadě, na výše zmíněném schématu, nás bude zajímat ztrátový výkon na červené P_R a kombinace ztrátových výkonů na červené P_R a zelené P_G (pro vytvoření žluté, či oranžové). V případě požadavku na míchání barev, je nutné, aby nebyl překročen rámec svítivosti – tzn., že při míchání oranžové by nemělo dojít při součtu středních proudů LED diodami k překročení I_{LED} – např.: poměrem středních proudů 50:50, či 40:60, atp. Výpočty jsou provedeny s červenou LED diodou, kdy napětí na červené LED je potom $U_{LED} \approx 2,8 \text{ V}$ a protékající proud $I_{LED} = 179 \text{ mA}$. Lze tedy psát, že výkon na diodě je:

$$P_{LED} = U_{LED} \cdot I_{LED} \quad (41)$$

kde: P_{LED} - ztrátový výkon LED diody [mW], I_{LED} - proud protékající LED [mA], U_{LED} - napětí na LED diodě při protékajícím proudu I_{LED} [V].

$$P_{LED} = U_{LED} \cdot I_{LED} = 2,8 \cdot 0,179 = 501 \text{ mW}$$

Jelikož je známo, že každá z diod může v matici svítit maximálně 1/5 periody, potom maximální střední výkon bude:

$$P_{LEDstř} = S \cdot P_{LED} \quad (42)$$

kde: P_{LED} - ztrátový výkon LED diody [mW], $P_{LEDstř}$ - střední ztrátový výkon LED diody [mW], S - střída multiplexu matice [-].

$$P_{LEDstř} = S \cdot P_{LED} = \frac{1}{5} \cdot 501 \cong 100 \text{ mW}$$

Z tohoto výkonu pouze 30% tvoří světlo, zbylých 70% tvoří odpadní teplo. Potom odváděný tepelný výkon je:

$$P_{TEP} = k_{TEP} \cdot P_{LEDstř} = 70 \text{ mW} \quad (43)$$

kde: P_{TEP} - výkon který se na LED diodě mění v teplo [mW], $P_{LEDstř}$ - střední ztrátový výkon LED diody [mW], k_{TEP} - konstanta přeměny elektrické energie v teplo [-].

$$P_{TEP} = k_{TEP} \cdot P_{LEDstř} = 0,7 \cdot 100 = 70 \text{ mW} = 0,07 \text{ W}$$

Za další, hrají velkou roli v oteplení jednotlivých komponent, dílčí tepelné odpory. Jejich výpočty jsou provedeny na následujících stránkách.

Stanovení dílčího tepelného odporu prokovů R_{thvie} [17][19]:

$$R_{th} = \frac{L}{\lambda \cdot S_t} \quad (44)$$

kde: R_{th} - tepelný odpor ve směru šíření tepla [K/W], L - délka materiálu ve směru šíření tepla [m], λ - tepelná vodivost materiálu [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]; pro měď je $\lambda_{Cu} = 380 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, S_t - plocha, kterou prostupuje teplo [m^2].

Jelikož jde skrz desku dvanáct těchto prokovů, bude nejprve potřeba spočítat elementární plochu (jednoho prokovu) S_{vie1} a poté spočítat součet všech těchto elementárních ploch S .

$$S_{vie1} = \pi \cdot [r^2 - (r - l_{cu})^2] \quad (45)$$

kde: S_{vie1} - plocha jednoho prokovu [m^2], l_{cu} - velikost galvanicky vyloučené mědi [m]; obvykle $l_{cu} = 10 \sim 15 \mu\text{m}$, r - poloměr vrtání [m].

$$S_{vie1} = \pi \cdot [(0,15 \cdot 10^{-3})^2 - (0,15 \cdot 10^{-3} - 0,015 \cdot 10^{-3})^2] = 4,275 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$$

Celková plocha S je:

$$S_c = n \cdot S_{vie1} \quad (46)$$

kde: S_c - celková plocha prokovů [m^2], S_{vie1} - plocha jednoho prokovu [m^2], n - počet prokovů.

$$S_c = n \cdot S_{vie1} = 12 \cdot 4,275 \cdot 10^{-9} = 5,13 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$$

Pro konečný vzorec je nutné stanovit délku L . Ta je dána tloušťkou desky 1,5 mm a tloušťkou měděné fólie z obou stran desky, tj 0,035 mm. Potom celkový tepelný odpor prokovů je:

$$R_{thvie} = \frac{(1,5+0,035+0,035) \cdot 10^{-3}}{380 \cdot 5,13 \cdot 10^{-8}} = 80,54 \text{ K/W}$$

Dílčí tepelný odpor podložky R_{thGP} :

Byla vybrána tepelná podložka LAIRD Technologies model A15959-02 o rozměrech 229 x 229 mm s tepelnou vodivostí $\lambda = 1,8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Tloušťka této fólie je 0,5 mm. Elementární plocha, pod kterou je tato podložka dána, je průměrně 8 x 8 mm² – jedná se o měděnou plochu pod každou led diodou na spodní straně DPS. Potom můžeme psát:

$$R_{thGP} = \frac{L}{\lambda \cdot S} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 64 \cdot 10^{-6}} = 4,3 \text{ K/W}$$

Dílčí tepelný odpor chladiče R_{thR} :

Byl vybrán chladič o velikosti 200x150 mm od výrobce Fischer Elektronik model SK42/150/SA. Jeho tepelný odpor výrobce udává $R_{thR} = 1,65 \text{ K/W}$. Pokud chceme získat tepelný odpor elementární plochy R_{thR1} , musíme vynásobit počtem LED čipu. Respektive vynásobit poměrnou částí plochy. To vychází z podstaty vzorce (29); čím menší plocha, tím vyšší tepelný odpor. V našem případě je plocha 320x menší a proto můžeme psát:

$$R_{thR1} = p_{\check{c}} \cdot R_{thR} \quad (47)$$

kde: R_{thR1} - elementární tepelný odpor chladiče [K/W], R_{thR} - tepelný odpor chladiče [K/W], $p_{\check{c}}$ - počet LED čipů [-].

$$R_{thR1} = p_{\check{c}} \cdot R_{thR} = 320 \cdot 1,65 = 528 \text{ K/W}$$

Stanovení celkového tepelného odporu:

$$R_{thT} = R_{thjc} + R_{thvie} + R_{thGP} + R_{thR1} \quad (48)$$

kde: R_{thT} - celkový tepelný odpor [K/W], R_{thjc} - tepelný odpor přechod-pouzdro [K/W], R_{thvie} - tepelný odpor prokovů [K/W], R_{thGP} - tepelný odpor tepelné podložky [K/W], R_{thR1} - elementární tepelný odpor chladiče [K/W].

$$R_{th} = 60 + 80,54 + 4,3 + 528 \cong 673 \text{ K/W}$$

Výpočet oteplení oproti okolí Δt :

Výsledné oteplení je dáno vzorcem [19]:

$$R_{thT} = \frac{\Delta t_{LED}}{P_{TEP}} \quad (49)$$

kde: R_{thT} - celkový tepelný odpor [K/W], Δt_{LED} - rozdíl teplot [K], P_{TEP} - výkon LED přeměněný v teplo [mW].

Pro stanovení Δt lze psát:

$$\Delta t_{LED} = R_{th} \cdot P_{TEP} = 673 \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cong 47 \text{ K} = 47 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

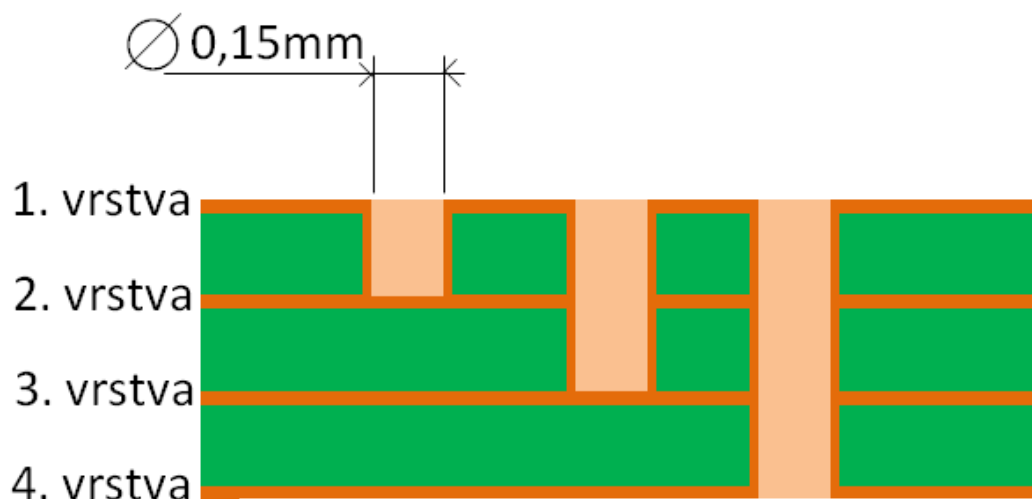
Jelikož jsou jednotky °C a K stejně škálovatelné, mohou být na relativní úrovni zaměňovat. Pro zajímavost, pokud budeme požadovat maximální výkon displeje – svícení bílou barvou – bude ztrátový výkon přibližně 3x vyšší a tedy i teplota bude dosahovat přibližně trojnásobné hodnoty, tj. $> 125\text{ °C}$ proti okolí. V takovém případě by bylo nutné zaručit výkonnější chlazení (např.: aktivní chlazení, větší chladič), popřípadě zvýšit plochu přenášení tepla přes desku jemnějším vrtáním a hustším osazením prokovů, tj. s průměrem vrtáku $< 0,3\text{ mm}$ (např.: $0,15\text{ mm}$).

3.2 Řídicí modul

Jedná se o složitější desku z obou DPS obsahující 4 vrstvy. Je velmi hustě osazená posilovacími obvody a obsahuje také DC-DC měnič, čipy a IDC konektory. Složená z 8 modulů s obvodem STLED524.

Vrstvy se dají rozdělit takto:

- první vrstva – horní měď; rozmístění součástek,
- druhá vrstva – rozlitá měď; připojená k napájecímu potenciálu,
- třetí vrstva – rozlitá měď; připojená k zemi,
- čtvrtá vrstva – spodní měď; rozšíření cest z první vrstvy.



Obr. 29 – Rozdělení vrstev

Při návrhu desky bylo nutné dbát na co možná nejhustší osazení součástkami. I přes to je výsledný rozměr desky $220 \times 330\text{ mm}$. Prostředkem desky na první a poslední vrstvě jsou vedeny komunikační kanály pro SPI. Zdroj je u této desky umístěn z horního pohledu vlevo nahoře. Nejsložitější částí byl návrh cest na všech vrstvách pod obvodem STLED524. Vedení

cest, včetně volby jejích tloušťek bylo ve finále realizováno s využitím doporučení výrobce obvodu (využití tzv. *recommended layout*). Celkový návrh DPS je součástí přílohy D v měřítku 3:4.

Oteplení vodičů

Pro výkonovou část DPS jsou použity cesty pouze s tloušťkou 0,6 mm. U zbylých signálových cest je šířka 0,25 mm. Cesta, která spojuje anodu LED diody s řídicím obvodem má tloušťku 0,6 mm a teče jí proud maximálně 180 mA. Od katody LED diody je vedena cesta o šířce 0,6 mm. Zde teče maximální proud 4,32 A po dobu 1/5 periody, tzn. jeho střední hodnota je 0,86A.

Pokud z grafu na *Obr. 40* (příloha E) odečteme, o kolik se oteplí oproti okolí cesty s šířkou 0,6 mm, tak je to $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ v obou případech – tedy jak vodič ke katodě, tak od anody LED diody.

Návrh cest obvodu STLED524

Typ pouzdra, ve kterém je obvod STLED524 je BGA pouzdro (angl. *Ball Grid Array*). Tento typ pouzdra se vyznačuje velmi malými rozměry a typově se hodí do hustě integrovaných aplikací (např.: mobilní telefony, PC). V našem případě má čip vnější rozměry 3,4 x 3 mm s rozmístěním pinů s roztečí 0,4 mm (viz *Obr. 41*, příloha F). Ačkoli svými rozměry ušetří součástka místo, je tento druh pouzdra velmi komplikovanou volbou, co se návrhu DPS týče.

Prvně byl řešen návrh cest tohoto obvodu vlastními koncepcemi. Nejprve, v rámci šetření, se návrh opíral o možnost realizace na 2 - vrstvé DPS, ovšem díky jemnosti spojů nepřipadal v úvahu. Postupovalo se poté návrhem 4 - vrstvé DPS, kde bylo nasnadě vyhnout se zaslepeným prokovům – tím se sníží cena výroby. Ovšem jak se později ukázalo, nebylo to možné. Zde probíhal návrh a ladění několikrát do bodu, kdy jsme obdrželi od výrobce doporučené vedení cest, viz *Obr. 42* (příloha G).

Tímto se práce velmi usnadnila, jelikož doporučení výrobce obsahovalo také tloušťky cest a také doporučené rozmístění součástek a tak na stávajícím návrhu byly provedeny úpravy podle tohoto doporučení (viz *Obr. 43*, příloha G). Technologicky bylo nutné přistoupit k řešení zaslepených prokovů (angl. *blind vias*) – viz *Obr. 29*. Průměr vrtání je 0,15 mm. Pro tak jemné vrtání je nutné snížit tloušťku desky – je to dáno technologií, která toto vyžaduje. Dostáváme tak, z původně navrhované tloušťky 1,6 mm desku o tloušťce 1,2 mm. Při své

velikosti 330 x 220 mm je deska náchylná na ohyb. V konečném důsledku, může způsobit nepříznivé prohnutí pod samotným obvodem a k utržení kontaktu. Mechanicky je cín mnohem více náchylný k prasknutí, nebo odtrhnutí než olovnatá pájka. K tomuto jevu může dojít také rozdílem teplot a následnou rozdílnou roztažností desky a čipu. Bude nutné dbát, aby mechanicky byla DPS zpevněna, např.: kovovým rámem z hliníkových profilů.

Výsledné vedení cest pod obvodem v jednotlivých vrstvách v programu EAGLE 7.6.0. Vrchní vrstva – červeně, první vnitřní vrstva – růžově, druhá vnitřní vrstva – žlutě, spodní vrstva – modře. Prokovy jsou zde znázorněny zeleně – viz *Obr. 44* (příloha G). Při návrhu byly zjištěny také jisté limity programu EAGLE. Například masku, pro nanášení pájivé pasty nebylo možné nastavit u prokovů, tak aby měla nižší průměr, než daný prokov – a tedy při pájení nedocházelo k rozlítí cínů mimo danou plošku. Alespoň umožňovala nulový přesah.

Byl zde problém také při kopírování. Jelikož se tato DPS skládá z 8mi modulů, které jsou prakticky totožné, nebylo nasnadě dělat každý modul zvlášť. Docházelo k návrhu vždy jen jednoho z modulu následně ke kopírování. Při tomto procesu docházelo k prohození symbolických jmen prvků – což znesnadňovalo kontrolu zapojení.

Dalším, v celku důležitým aspektem, při návrhu, byla vizuální kontrola, zda dochází při tvorbě prokovů spojení v námi zvolených vrstvách. V tomto programu tato kontrola nebyla možná. Proběhla až po vytvoření gerber dat v programu GC Prevue.

Gerber data byla spolu s osazovacím plánem poté poslána výrobcí pro výrobu desky a osazení. Vzhledem k složitosti, výroba desky probíhala několikanásobně. Došlo k posunutí termínu dodání z původních tří týdnů na sedm týdnů.

3.3 Zohlednění dalších parametrů

EMC

Bylo vytvořeno několik opatření, abychom potlačili či zamezili vlivu elektromagnetického rušení. Pro první desku s LED diodami je ke spodní straně připevněn chladič. Ten by měl být dále zemněn. Tímto způsobem se omezí elektromagnetické rušení ve směru od LED diod pod chladič. V této koncepci to bude mít význam, hlavně proto, že bychom mohli obě DPS tak, že DPS s LED diodami bude umístěna nad DPS s řídicí elektronikou – vytvoření kompaktní konstrukce.

Pro DPS s řídicí elektronikou, se potlačení vlivu elektromagnetického rušení provedlo, rozlítím mědi v jednotlivých vrstvách. Tato „volná“ měď je taktéž zemněná. Tímto dochází k minimalizaci rušení v obou kolmých směrech na DPS.

Teplotní odolnost

Součástky s největším oteplením v celé zapojení jsou obvod STLED524 s oteplením o 35 °C a LED diody s oteplením o 47 °C. Nutno dodat, že toto oteplení nastává při teoretickém třetinovém příkonu. Je – li maximální teplota přechodu $T_{jPN} = 125\text{ °C}$. Potom čistým odečtením mezi maximální teplotou přechodu a teplotou součástky (nejvíce tepelně namáhané) vůči okolí, získáme maximální teplotu okolí - $T_{aMAX} = 78\text{ °C}$ ($=125\text{ °C}-47\text{ °C}$).

Energetická účinnost

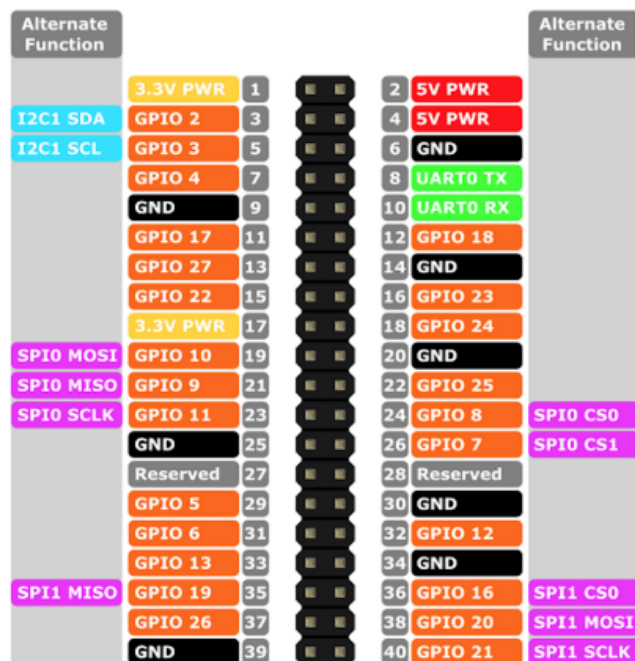
Energetická účinnost byla řešena ve zdroji. Proto byl vybrán snižující spínaný zdroj, resp. obvod výrobce LINEAR TECHNOLOGY LT3741. Pro podmínky, kdy je vstupní napětí 20V a výstupní napájecí hladina 5V, při odebíraném teoretické proudu 15,3 A je účinnost tohoto zdroje $\approx 88\%$.

Náklady

Náklady byly první hlavní položkou při návrhu. Zde se musel sejít průnik očekávaného výkonu a právě pořizovací ceny. Ačkoli pořizovací cena součástek a jejich výkon byl vybírán optimálně, později se ukázaly nevýhody samotného BGA pouzdra obvodu STLED524. Zde se muselo přistoupit k čtyřvrstvé DPS, což zvedlo náklady několikanásobně. Pokud by mělo dojít k novému výběru součástek, bylo by nasnadě, aby typ pouzdra měl jednodušší konstrukci, čímž by v následné výrobě snížil cenu.

3.4 Firmware

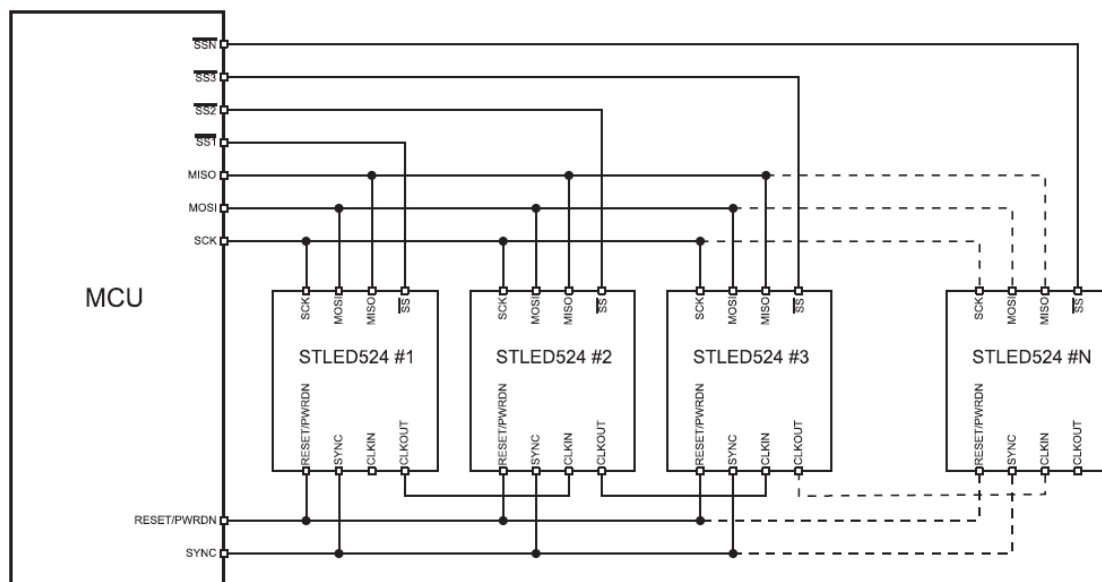
Firmware pro ovládání displeje, resp. řídicích obvodu STLED524 poběží na platformě Raspberry PI 3. Tato platforma je velmi oblíbeným nástrojem pro hobby, či jako náhrada klasického PC. Jedná se o jednodeskový počítač, tzv. SoC (angl. *System on Chip*) běžícím na čipu Broadcom 2837. Jako vstupně výstupní rozhraní slouží 40-ti pinový konektor (*Obr. 30*).



Obr. 30 – Popis pinů Raspberry PI 3

Primárním operačním systémem je Raspbian (je to jedna z distribucí Debianu). Další mohou být např.: Windows 10 IoT, či jiné distribuce Linuxu. Nespornou výhodou této platformy je, že vývoj celé aplikace je možné provádět čistě zde – návrhy, realizaci i ladění. Pro naše účely jsme vybrali prostředí Geany IDE. Jedná se o C/C++ kompilátor s jednoduchým a intuitivním ovládáním. Zde budeme tvořit algoritmus ovládání pro obvody STLED524.

Komunikace mezi jednotlivými moduly na řídicí desce je po sběrnici SPI s maximální hodinovou frekvencí 20 MHz. Každý z těchto modulů má vlastní SS pin (čes. *výběr obvodu*, angl. *chip select*). Tyto moduly se řadí do kaskádového uskupení a v podstatě nejsou omezeny maximálním počtem obvodů, které lze řídit – viz Obr. 31.



Obr. 31 – Řazení obvodů STLED524 ve vztahu k řídicímu MCU

Algoritmus programu

Samotným základem pro práci s Raspberry Pi je využití knihovny *bcm2835.h*, dostupné ze stránek <http://www.airspayce.com/mikem/bcm2835/>. Jde o uživatelsky vytvořenou knihovnu funkcí pro vstupně-výstupní operace – tedy mezi MCU a periferiemi. Tato knihovna nám podporuje aplikaci sběrnice SPI. Má svou inicializační část a ukončovací část. V těle programu využíváme jejich základních funkcí pro práci se sběrnici. Tyto funkce jsou:

`bcm2835_spi_transfer()`

- funkce slouží k odeslání a čtení jednoho bytu; návratová hodnota obsahuje přečtená data,

`bcm2835_spi_transfern()`

- funkce sloužící k odeslání a čtení pole bytů; dochází k přepisu zdrojového pole dat,

`bcm2835_spi_transferb()`

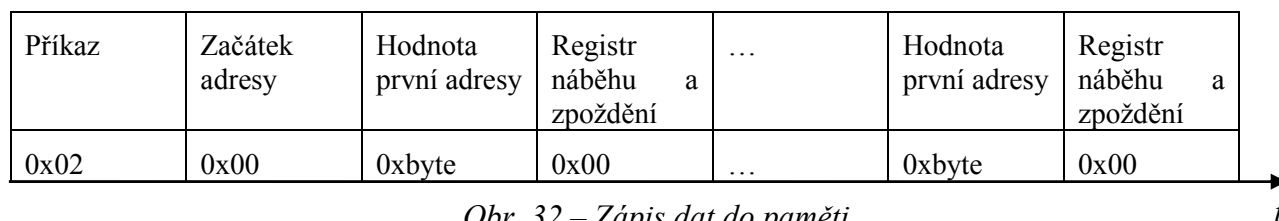
- funkce sloužící k odeslání a čtení pole bytů; nedochází k přepisu zdrojového pole dat.

Spolu s touto knihovnou byla vytvořena uživatelská knihovna *functions.h*. Jejím hlavním cílem bylo vytvořit jednoduchý soubor funkcí pro ovládání obvodů STLED524. Je založena na příkazech po sběrnici SPI – ty jsou součástí datasheetu součástky STLED524 [9]. Soubor všech příkazů na sběrnici SPI je uveden v *Tab. 8*.

Tab. 8 – Soubor příkazů na sběrnici SPI pro práci s obvodem STLED524

Příkaz	Hodnota [hexa]	Hodnota [binar]
Zápis do kontrolního registru	00xh	00000000b
Zápis do paměti 1	02xh	00000010b
Zápis do paměti 2	04xh	00000100b
Čtení z kontrolního registru	01xh	00000001b
Čtení z paměti 1	03xh	00000011b
Čtení z paměti 2	05xh	00000101b

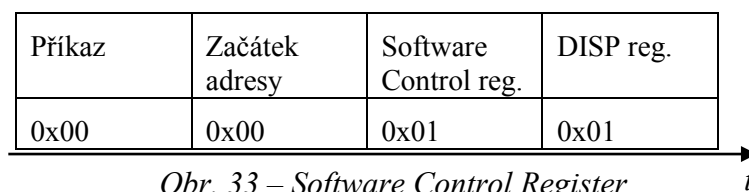
Obvod obsahuje dvě paměti, do kterých se ukládají data, jež se mají zobrazit (paměť 1, paměť 2). Prakticky budeme využívat pouze jednu paměť. Zápis do paměti potom probíhá na sběrnici SPI viz následující obrázek.



Obr. 32 – Zápis dat do paměti

Nejprve se vyšle byte s příkazem. Následně se posílá začátek adresy, kde se má v paměti zapisovat. Každý bod matice je v paměti reprezentován právě adresou – pro začínáme adresou 0x00. Poté následuje hodnota, jež se do paměti zapisuje. Ta reprezentuje PWM hodnotu od 0 po 255. Tímto můžeme každému bodu přiřadit hodnotu svítivosti. Dále dochází automaticky po zaplnění každé části paměti (jeden byte) k inkrementaci adresy. Následuje registr náběhu a zpoždění. Ten slouží k efektům, kdy např.: se zpozdí rozsvícení daného bodu. Tento registr nebudeme používat. Je ovšem součástí zprávy a proto jej budeme plnit hodnotou 0x00. K inkrementaci dochází až do maximální hodnoty, tj. 239 (0xEF), nebo ukončení komunikace na sběrnici.

Pro zobrazení daného vzoru v paměti je poté nutné v registru *software control register* nastavit bit EN=1 a nastavení, ze které paměti chceme číst v registru *DISP*. Tyto registry se z pohledu adresování nacházejí na začátku, tedy na adrese 0x00 a jsou po sobě jdoucí. Zápis do těchto registrů je následující.



Obr. 33 – Software Control Register

Z těchto elementárních operací se následně skládá celý algoritmus. Tvorba obrazu na displeji je založená na načtení dat z polí. V těchto polích jsou data právě uložená ve formě, která umožní snadné překopírování dat do paměti obvodu STLED524. Tedy, algoritmus zobrazení není založen na výpočtech ale na vyčítání statických dat (z polí) a operacemi s nimi. Toto je mimo jiné zaběhnutý systém využívání dat v automotive. Takto nedochází k přepisům dat v paměti a tedy i chybám. Data či pole dat jsou staticky uložena. Algoritmus programu je součástí přílohy H.

Popis funkcí

Funkce obrysového světla: využití displeje do max. 1/3 velikosti, barva pouze červená, svítivost nastavená na 100% - zápis hodnoty 0xFF do paměti obvodu STLED524.

Funkce brzdového světla: využití displeje do max. 1/3 velikosti, barva pouze červená, svítivost nastavená na 100% - zápis hodnoty 0xFF do paměti obvodu STLED524.

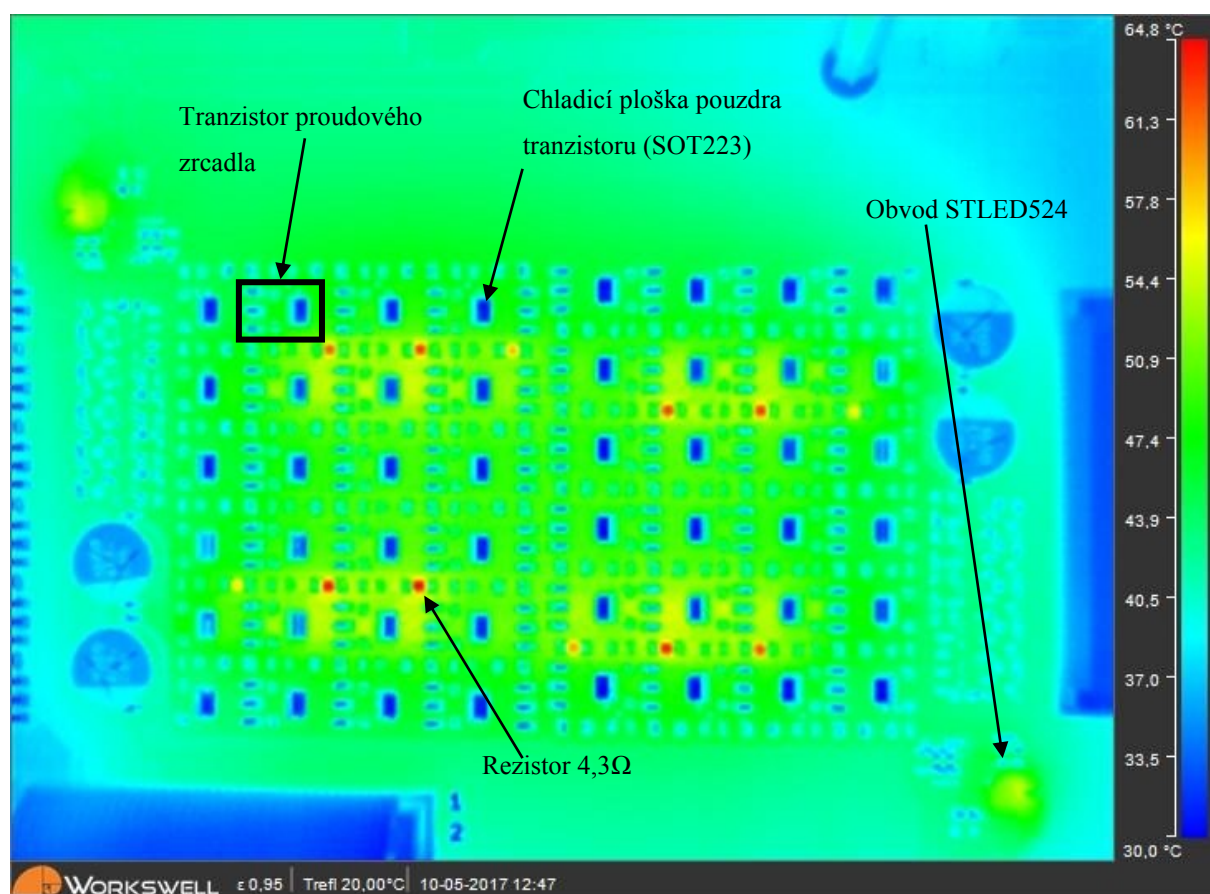
Funkce směrového světla: využití displeje do max. 1/3 velikosti, barva je kombinací červené a zelené barvy. Svítivost je u každé červené LED nastavená na 100% - zápis hodnoty 0xFF do paměti obvodu STLED524. Pro zelenou LED nastavení svítivosti na 50% – zápis hodnoty 0xEF do paměti obvodu STLED524.

Do této doby realizovaný vývoj byl dotažen do úrovně jednoduchých geometrických obrazců, složitější funkce jsou součástí dalšího vývoje. Námi vytvořené funkce jsou součástí přílohy I.

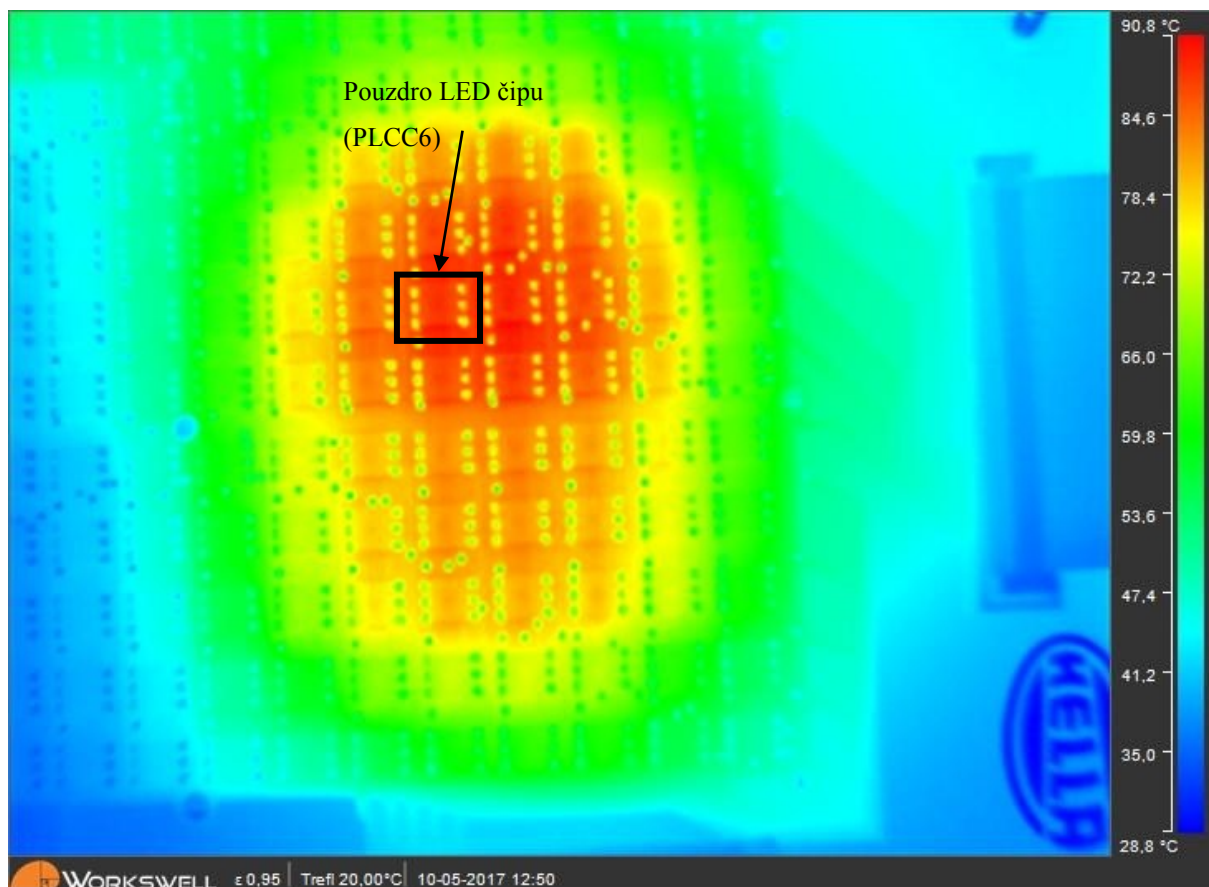
4 Experimentální ověření

V rámci experimentálního ověření došlo k tepelnému testování obou modulů. Výsledky testů jsou znázorněny na obrázcích *Obr. 34* a *Obr. 35*. Zbylé soubory jsou součástí přílohy J. Testy byly prováděny termokamerou Workswell WIC od společnosti Workswell s.r.o. Z důvodu komplikací s výrobou finálních vzorků nebylo možné moduly plně testovat na EMC, nicméně byl proveden plán EMC testů, který bude realizován ve velmi krátkém čase.

Pro přesnější měření termokamerou by bylo nutné povrch sjednotit, např.: nabarvením povrchu černou barvou, aby nedocházelo odrazům od okolí o lesklé povrchy. Příkladem takového povrchu je chladičí ploška bipolárního tranzistoru (kolektor) v pouzdře SOT223. Tato ploška má cínově hladký povrch a tedy i vysoký odraz – stejně se dají hodnotit také nožky tranzistoru. Na obrázcích níže jsou tmavě modře zobrazeny chladnější a směrem k tmavě červené objekty teplejší. Funkce, která nejvíce emituje teplo je brzdové světlo.



Obr. 34 – Termální detail části řídicího modulu obsluhující brzdové světlo – maximální oteplení dosahuje rezistor $R_1 = 4,3\Omega$ v proudových zrcadlech, tj. $64,8\text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 35 – Termální detail části LED modulu – funkce brzdového světla – maximálního oteplení je uvnitř matice LED diod dané funkce, tj. 90,8 °C

Za pomoci osciloskopu byl experimentálně změřen proud náhodně vybranou LED diodou za pomoci úbytku napětí na rezistoru $R_1 = 4,3 \, \Omega$. Hodnota proudu byla $I_{LED} = 162 \, \text{mA}$. Byl změřen celkový proud pro napájení obou modulu $I_{TOT} = 9,37 \, \text{A}$, při napětí $U_{cc} = 5 \, \text{V}$.

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat koncept automobilové zadní svítilny s RGB LED maticí včetně vývoje základních funkcí svítilny. V první řadě bylo nutné najít vhodný typ LED čipu a k němu řídicí obvod. Byl vybrán LED čip výrobce OptoSupply model OSTCXBSGC1E a řídicí obvod STLED524, který dokáže řídit 40 RGB LED čipů. Pro realizaci zadní svítilny a všech jejích základních funkcí byl optimálně stanoven celkový počet LED čipu na 320 a k nim 8 řídicích obvodů.

Následující část práce se věnovala návrhem elektroniky. Předpokládaný proud LED diodami byl stanoven na 200 mA. Ovšem řídicí obvod byl schopen dodat maximálně 20 mA na LED diodu. Pro řešení tohoto problému byly navrženy posilovací obvody obvodu STLED524. Po simulaci zapojení v prostředí LT Spice byl proud diodou stanoven na 180 mA. Jako součást kontroly byly provedeny výpočty příkonů a bylo ověřeno, že nedochází k maximálnímu oteplení kritických součástek. Celé zapojení využívá jednu napájecí hladinu a to $U_{cc} = 5\text{ V}$. Pro tento účel byl zvolen DC-DC snižující měnič od výrobce LINEAR TECHNOLOGY, obvod LT3741 v pouzdře TSSOP-20. Výpočtem bylo zjištěno, že maximální proud celého zapojení by neměl překročit 15,3 A. Při tomto proudu je účinnost měniče 88%. Jak se později ukázalo, při návrhu součástky v prostředí EAGLE, bylo chybně značeno číslování části pinů. To bylo zjištěno až při ožiování DPS řídicího modulu. Problém byl řešen vypájením obvodu a připojením modulu k laboratornímu zdroji.

Návrh DPS byl rozdělen do dvou kroků. Nejprve byla navrhována DPS pro LED modul a následně DPS pro řídicí modul. Modul s LED diodami je jednodušší z obou desek. Jedná se o dvou vrstvou DPS na jejíž přední straně je umístěno 320 LED čipů s roztečí 8,5 mm od středu pouzdra v horizontálním i ve vertikálním směru. Každý z LED čipů je chlazen 12-ti prokovy, které odvádějí teplo na opačnou stranu DPS. Z tohoto důvodu není DPS ze spodní strany maskována, aby bylo možné později přiložit chladič.

V druhém kroku byla navržena DPS řídicího modulu. Vzhledem k vybranému řídicímu obvodu STLED524 v pouzdru BGA, bylo nutné navrhnout DPS jako čtyř vrstvou. Nejprve se návrh opíral o vlastní uvážení vedení cest pod tímto obvodem, do doby než jsme od výrobce řídicího obdrželi doporučené vedení cest a rozmístění součástek. Technologicky bylo nutné přistoupit k zaslepeným prokovům s vrtáním 150 μm . Deska je poměrně tenká, vzhledem k požadavku na jemné vrtání. Proto nezbytné zacházet s DPS opatrně, aby nedošlo k vyloupnutí řídicích obvodů. Celkový návrh obou desek byl poměrně časově náročný.

Poté byly gerber data obou DPS poslány výrobcí PragoBoard s.r.o. a následně osazena u firmy SAFIRAL s.r.o. Délka výroby a osazení obou modulů trvala 7 týdnů. Výběrem BGA

součástky došlo ke komplikaci z pohledu nákladů, jelikož musely být při výrobě požitý technologicky náročnější postupy.

Další částí práce bylo oživení zadní svítilny včetně funkcí. Pro řízení obvodů STLED524 bylo použito řídicího počítače Raspberry Pi 3. Veškerá komunikace probíhá na sběrnici SPI. Byly realizovány tři základní funkce – brzdové, obrysové a směrové světlo. Prozatím jsou příkazy uživatele pro rozsvěcení vedeny přes terminál. V budoucnu bude přistoupeno k využití spínačů a tlačítek k provádění zapínání jednotlivých funkcí. Do této doby realizovaný vývoj byl dotažen do úrovně jednoduchých geometrických obrazců, složitější funkce jsou součástí dalšího vývoje.

V posledním kroku bylo prováděno tepelné ověření obou modulů termokamerou. Pro námi zvolené a realizované funkce nebyl překročen rámec maximálních teplot součástek. Přesto, nejvyšších teplot bylo dosaženo u LED diod uvnitř matice u funkce brzdového světla. Teplota dosahovala 90,8 °C při pokojové teplotě. Nutno dodat, že na DPS LED modulu nebyl umístěn chladič.

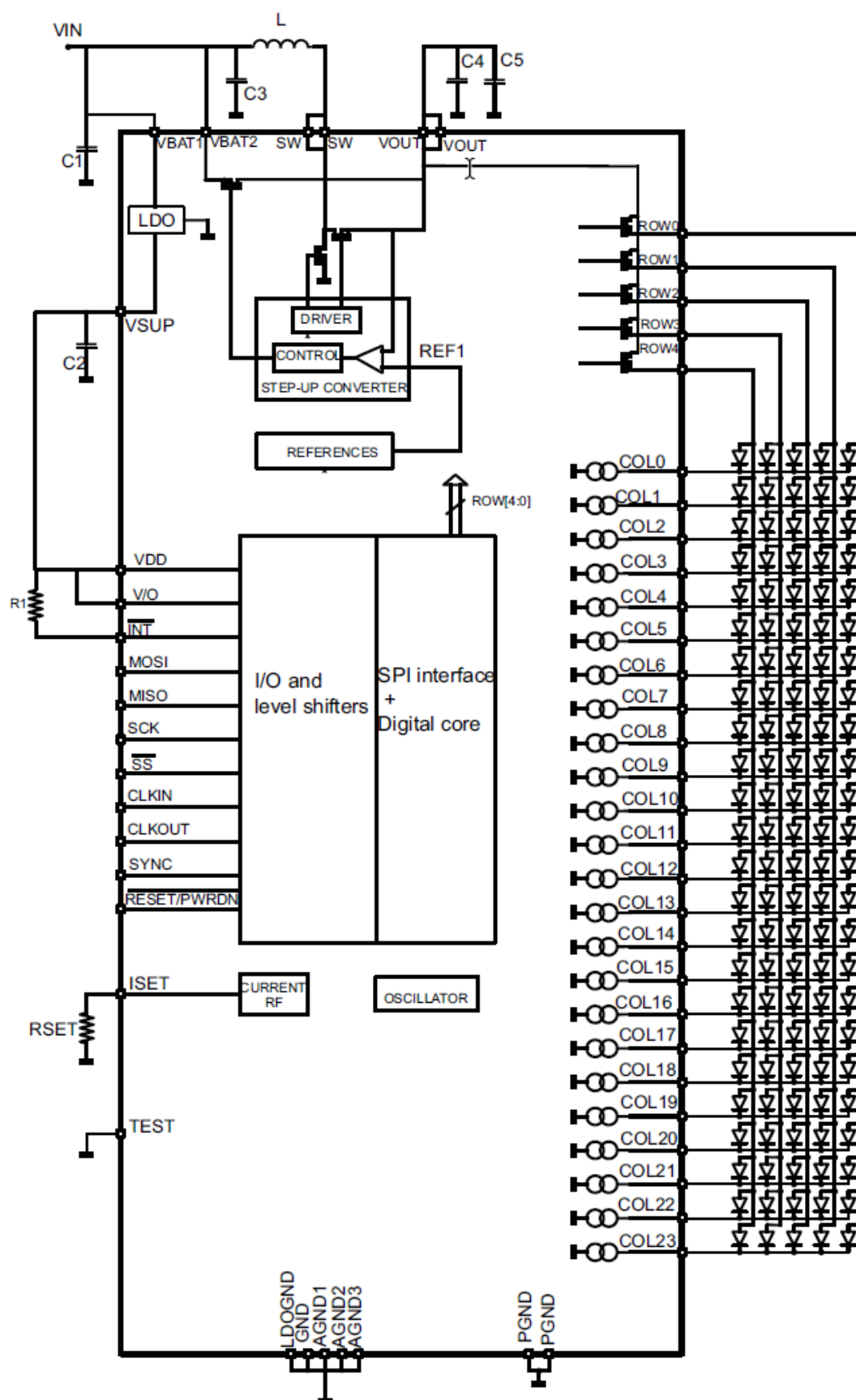
Z důvodu komplikací s výrobou finálních vzorků nebylo možné moduly plně testovat na EMC, nicméně byl proveden plán EMC testů, který bude realizován ve velmi krátkém čase. Již v současné podobě vykazuje navržený a realizovaný vzorek svítilny určité známky problémů se zarušením. Tento problém bude součástí řešení navazující práce.

Měřením byl také změřen proud náhodně zvolenou LED diodou. Hodnota tohoto proudu je 162 mA. Celé zapojení s námi navrženými světelnými funkcemi má maximální odběr proudu 9,37 A.

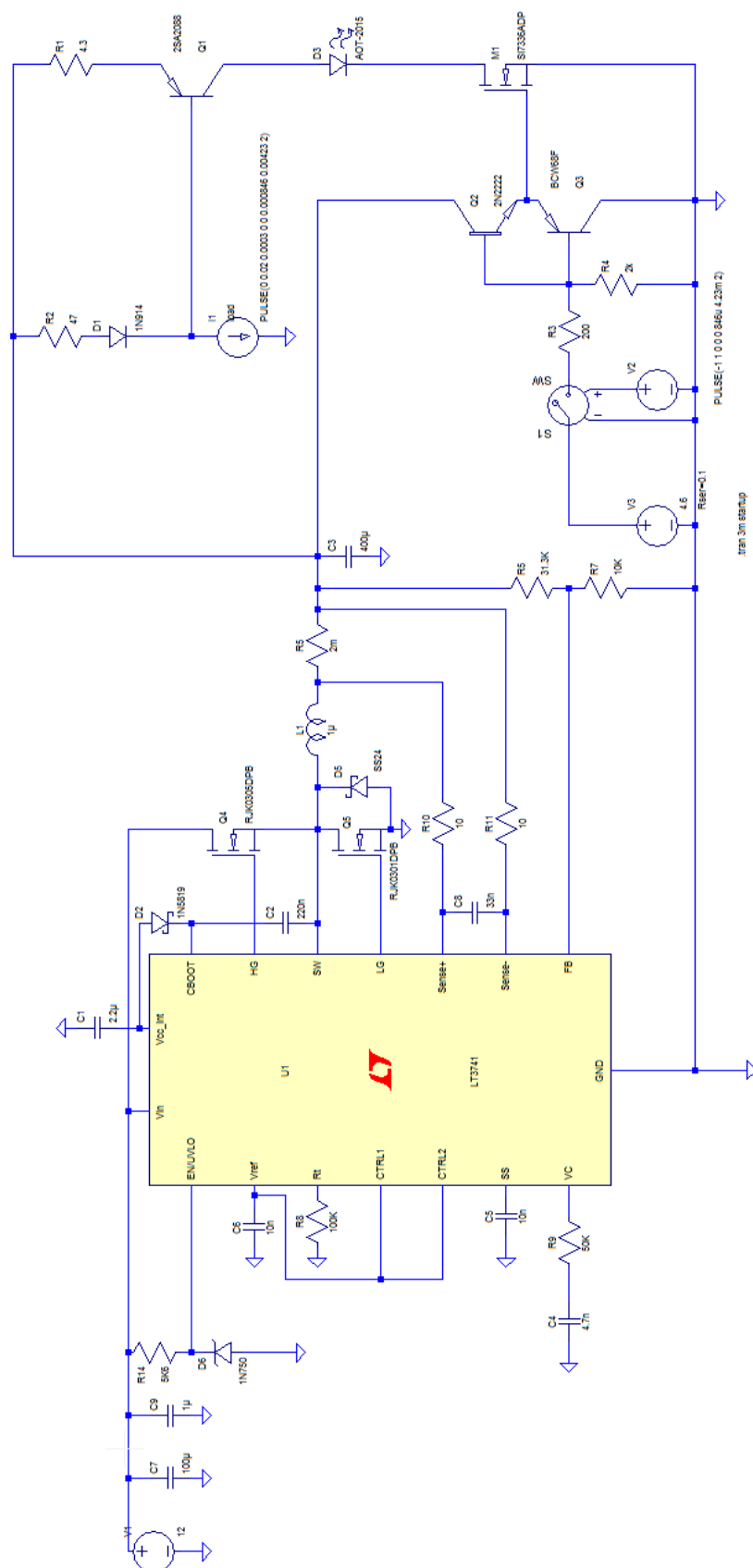
6 Seznam použité literatury a zdrojů

1. Multi-function lamps. *Hella.com*. [Online] 2017. [Citace: 18. 3. 2017] <https://www.hella.com/hella-com/Multi-function-Lamps-488.html>
2. Introduction to Driving LED Matrices. *Electro-tech-online.com*. [Online] 2012. [Citace: 18. 3. 2017] <http://www.electro-tech-online.com/attachments/introduction-to-driving-led-matrices-pdf.14010/>.
3. Střední a efektivní hodnota. *Amber.feld.cvut.cz*. [Online] 2010. [Citace: 18. 3. 2017] <http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo1/files/Variables.pdf>.
4. OSRAM LE RTDUW S2W. *Osram-os.com*. [Online] 2013. [Citace: 18. 3. 2017] http://www.osram-os.com/Graphics/XPic7/00137402_0.pdf.
5. Additive and Subtractive Color Mixing. *Tvtechnology.com*. [Online] 2013. [Citace: 18. 3. 2017] <http://www.tvtechnology.com/insight/0083/additive-and-subtractive-color-mixing/221090>.
6. Lightning calculators. *Rapidtables.com*. [Online] 2017. [Citace: 19. 3. 2017] <http://www.rapidtables.com/calc/light/lumen-to-candela-calculator.htm>.
7. Khan, M. Nisa. *Understanding LED Illumination*. New York: Taylor & Francis Group, LLC, nakladatelství a vydavatelství. 2013. ISBN 978-1-4665-0773-9.
8. Opto Supply. *Optosupply.com*. [Online] 2017. [Citace: 21. 3. 2017] <http://www.optosupply.com/uppic/2016811551507.pdf>.
9. Intelligent matrix LED display driver. *ST.com*. [Online] 2017. [Citace: 21. 3. 2017] <http://www.st.com/en/power-management/stled524.html>.
10. Nové obvodové prvky pro zpracování signálů v proudovém módu. *Elektrorevue.cz* [Online] 2004. [Citace: 22. 3. 2017] <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04028/index.html>.
11. Tranzistory. *352lab.vsb.cz* [Online] 2004. [Citace: 23. 3. 2017] <http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Tonhauser/tr.html>.
12. Stengl, J. Peer, Tihanyi J. *Výkonové tranzistory MOSFET*. Praha: BEN – Technická literatura, nakladatelství a vydavatelství. 1999. ISBN 3-7905-0619-2.
13. LT3741/LT3741-1. *Linear.com* [Online] 2017. [Citace: 1. 4. 2017] <http://www.linear.com/product/LT3741>.
14. Konstrukční pravidla. *Pcb.gatema.cz* [Online] 2017. [Citace: 1. 4. 2017] <http://pcb.gatema.cz/konstrukcni-pravidla/>.
15. Proudová zatížitelnost vodiče. *Pcb.cz* [Online] 2017. [Citace: 1. 4. 2017] <http://www.pcb.cz/node/34>.

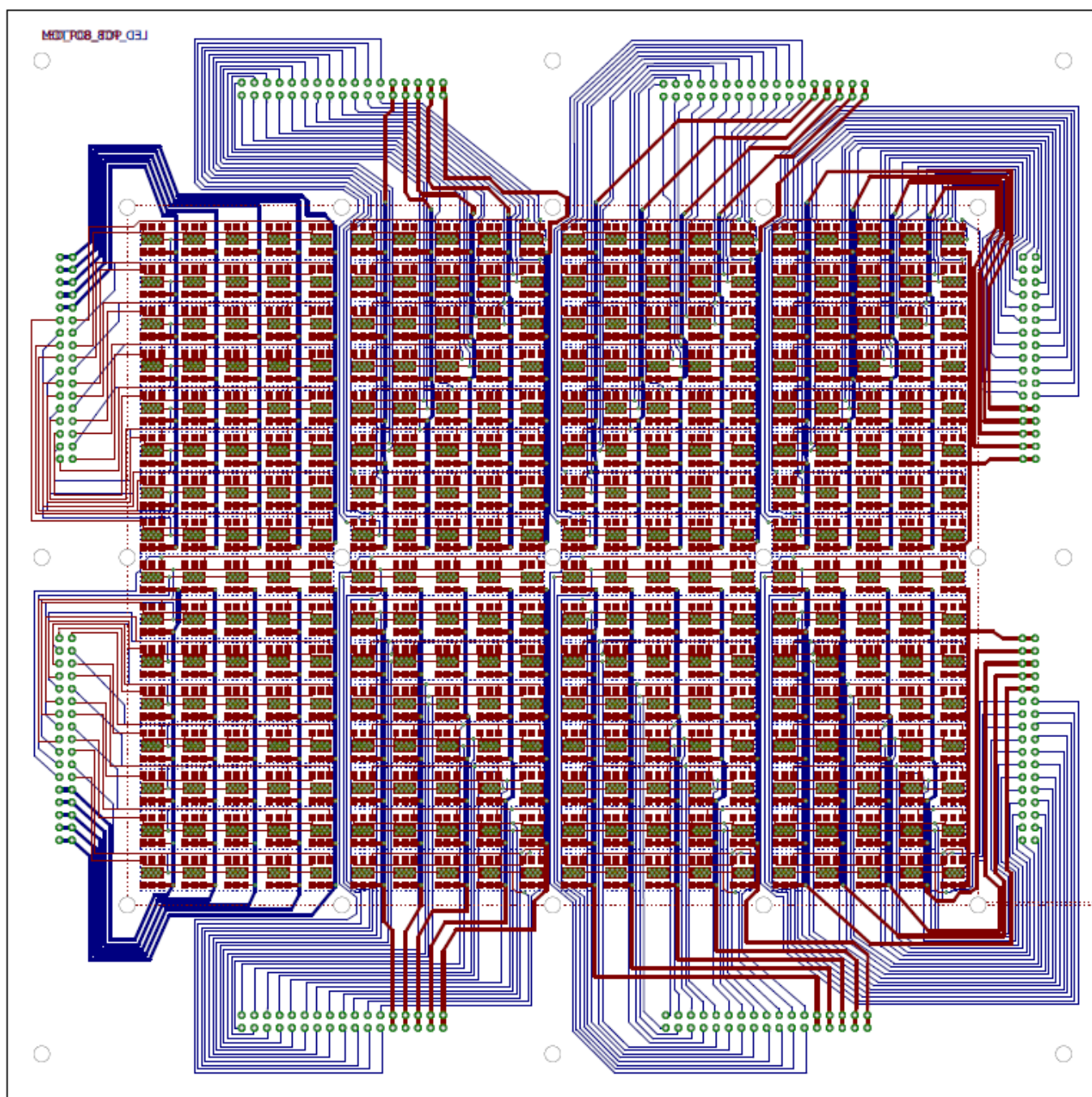
16. LEDs for Fluorescence Microscopy. *Photonics.com* [Online] 2008.
[Citace: 2. 4. 2017] <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=32390>.
17. Schenk, D. *Diplomová práce, Optimalizace desky plošného spoje pro výkonovou LED*. Brno: VUT, 2013.
18. LA G6SP. *Osram-os.com* [Online] 2017. [Citace: 2. 4. 2017] http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/led-light-emitting-diodes/advanced-power-topled/la-g6sp/index.jsp.
19. Návrh chladiče. *Dmaster.wz.cz* [Online] 2017. [Citace: 2. 4. 2017] <http://www.dmaster.wz.cz/postupy/chladice/chladice.htm>



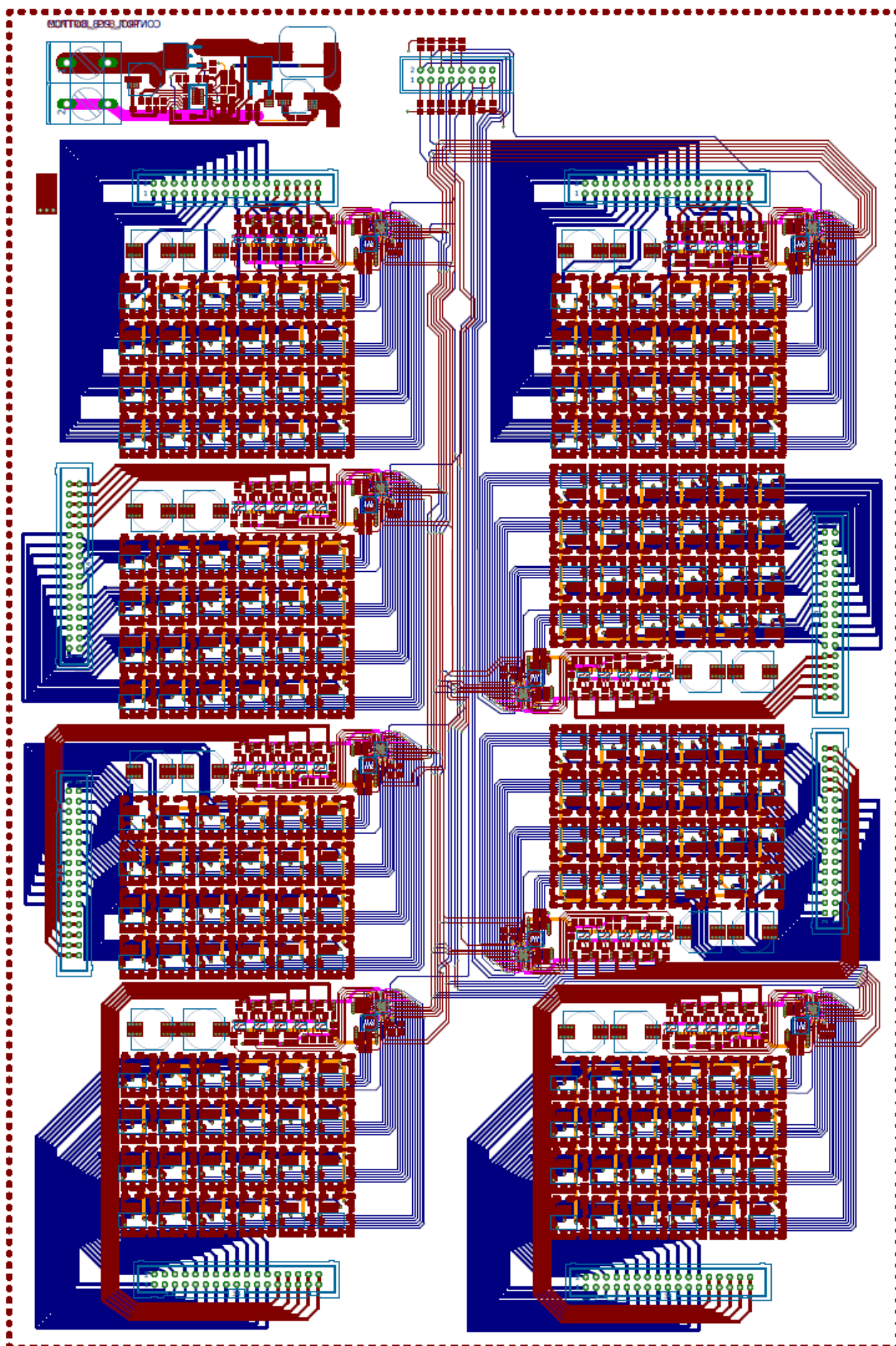
Obr. 36 – Vnitřní zapojení obvodu STLED524



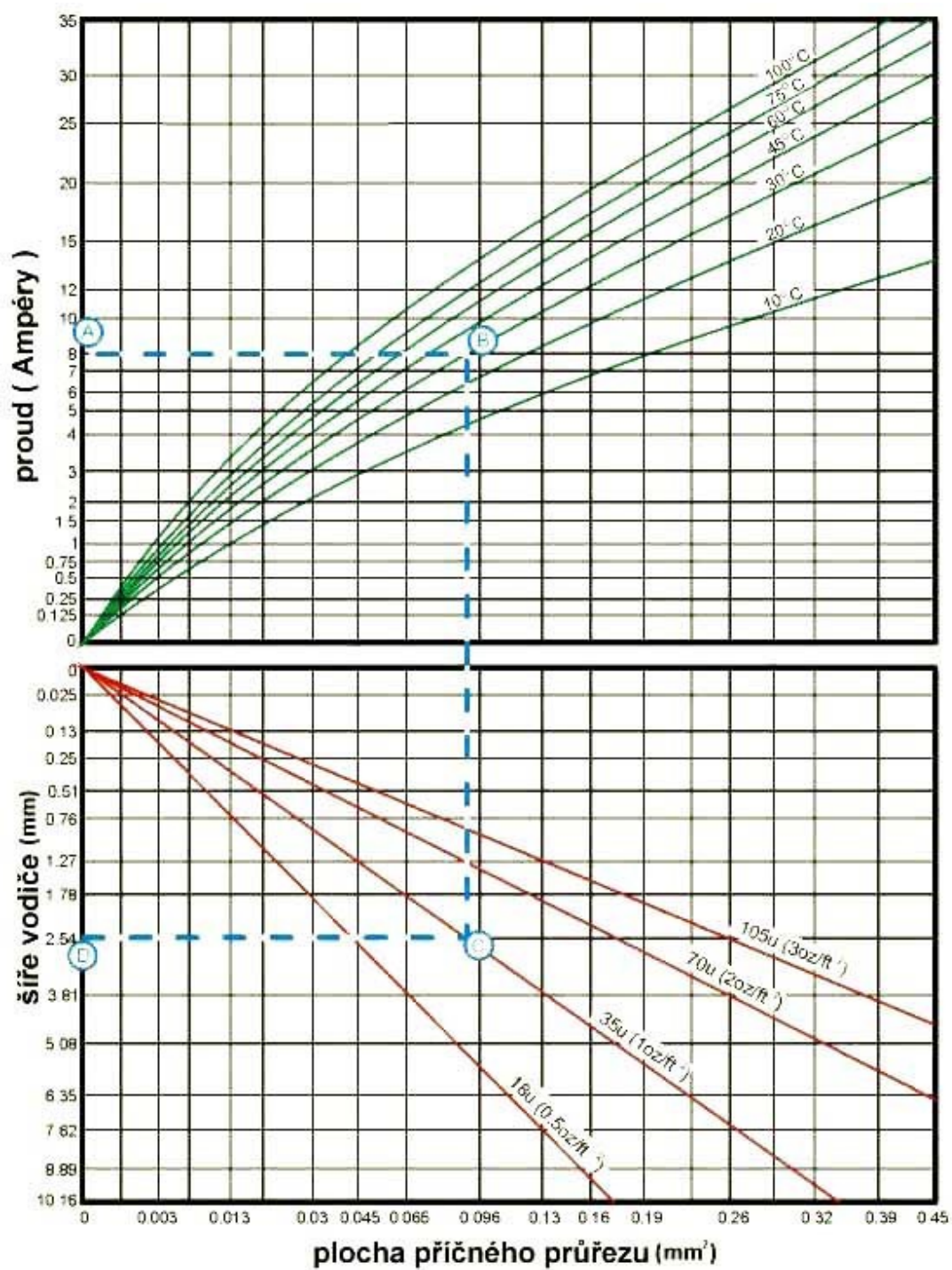
Obr. 37 – Schéma celkového zapojení v LT Spice



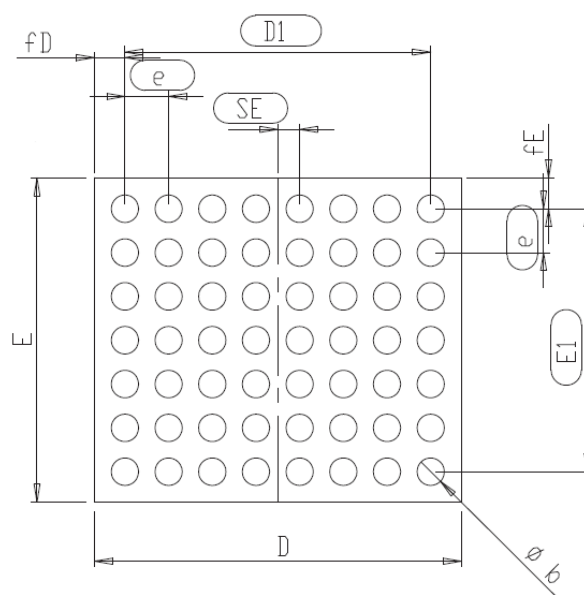
Obr. 38 – DPS LED modulu



Obr. 39 – DPS řídicího modulu



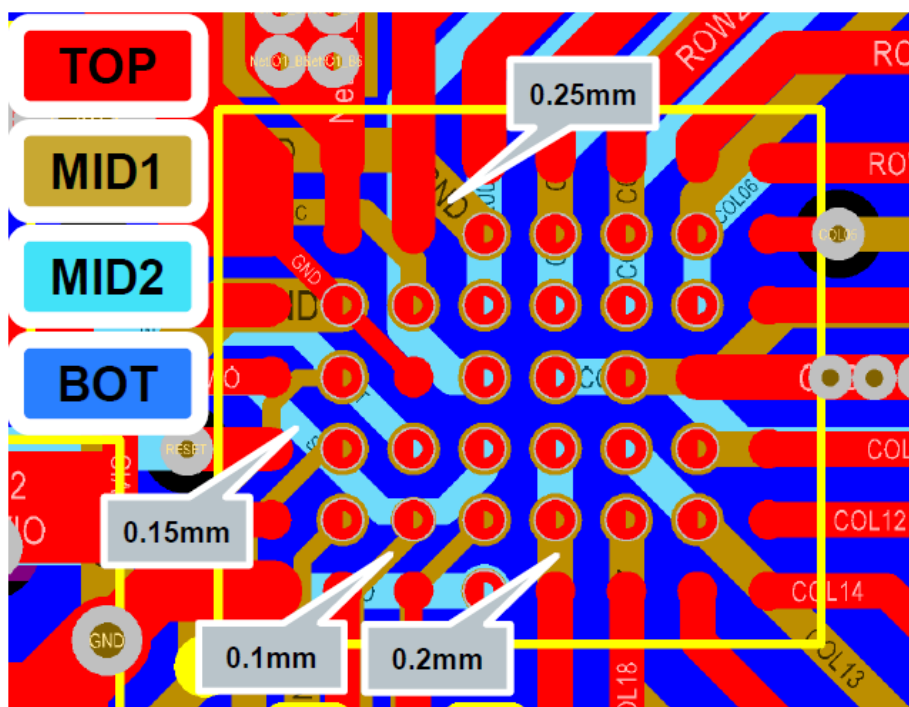
Obr. 40 – Graf teplotního nárůstu v závislosti na proudovém zatížení [15]



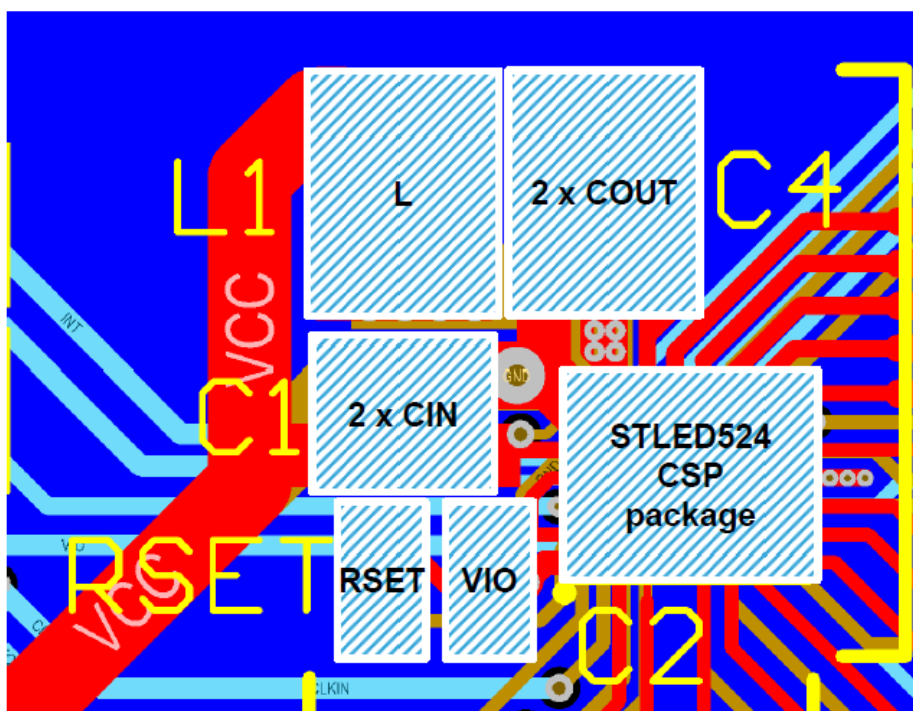
Obr. 41 – Rozměry obvodu STLED524

Tab. 9 – Hodnoty uváděných kót

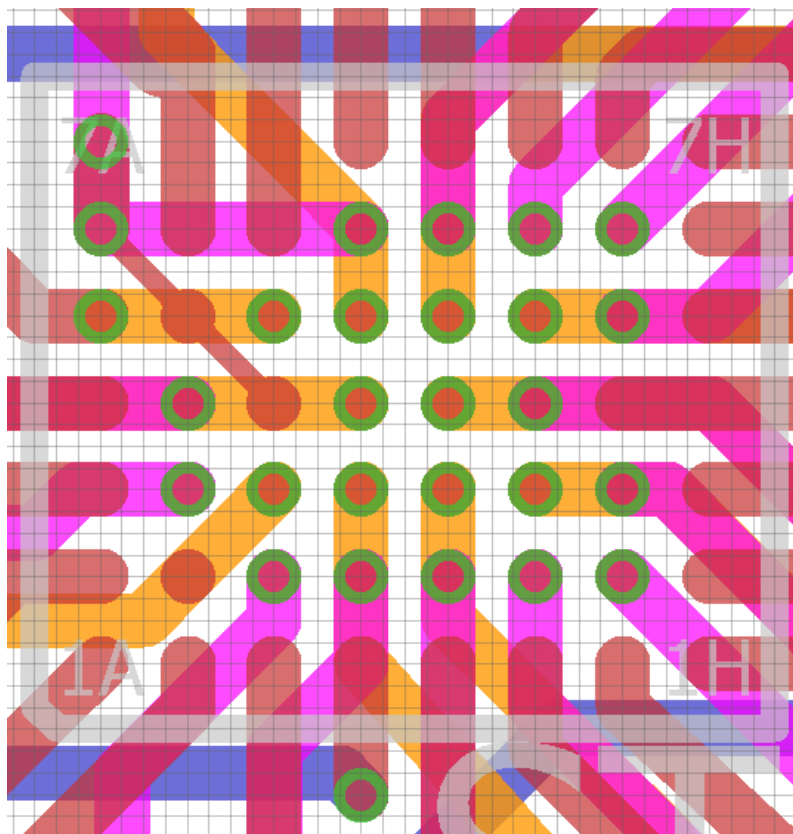
Rozměr	Min. (mm)	Typ. (mm)	Max. (mm)
b	0,23	0,25	0,29
D	3,34	3,37	3,4
D1		2,8	
E	2,94	2,97	3
E1		2,4	
e		0,4	
SE		0,2	
fD		0,285	
fE		0,285	



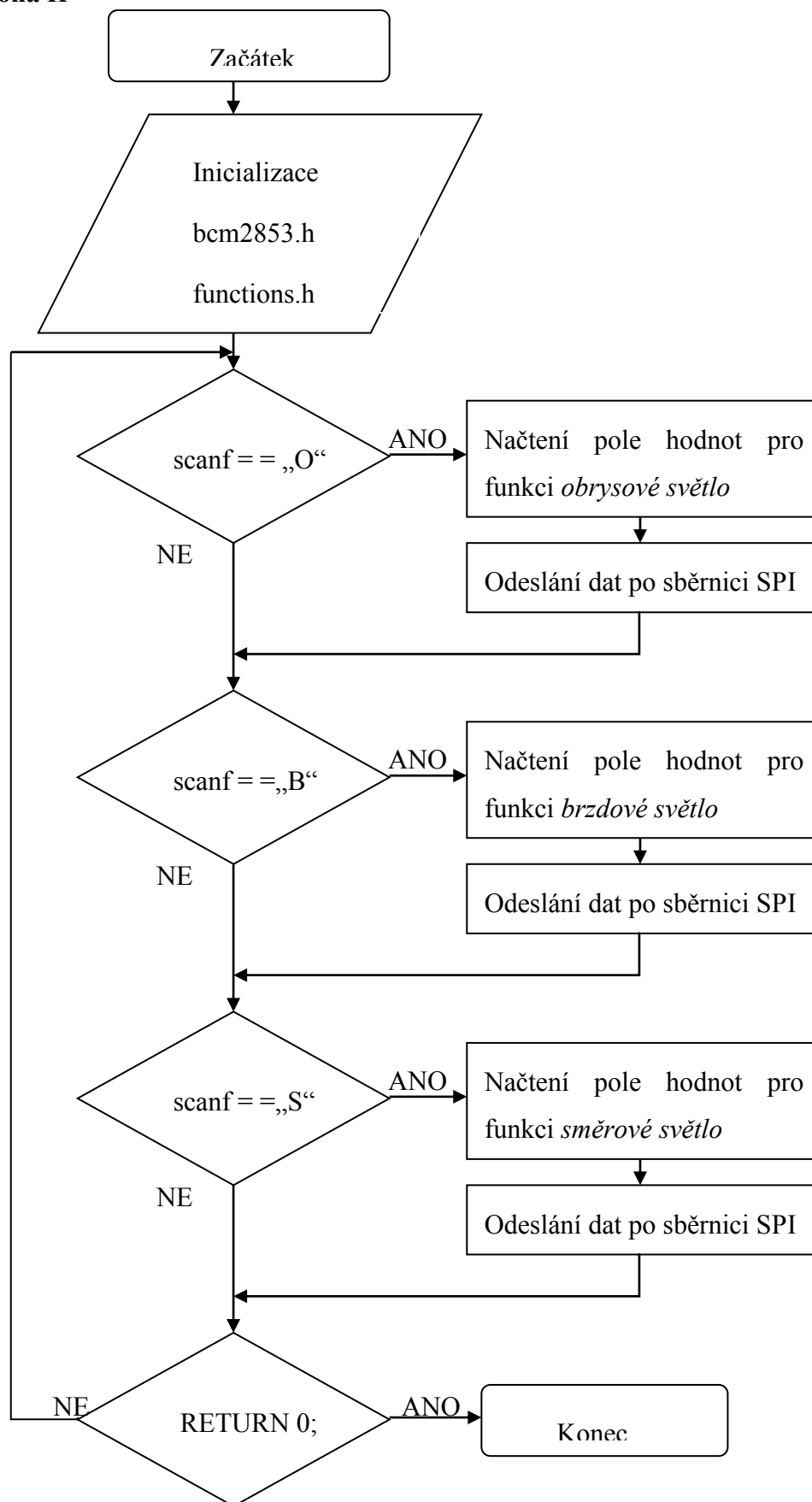
Obr. 42 – Doporučené vedení cest



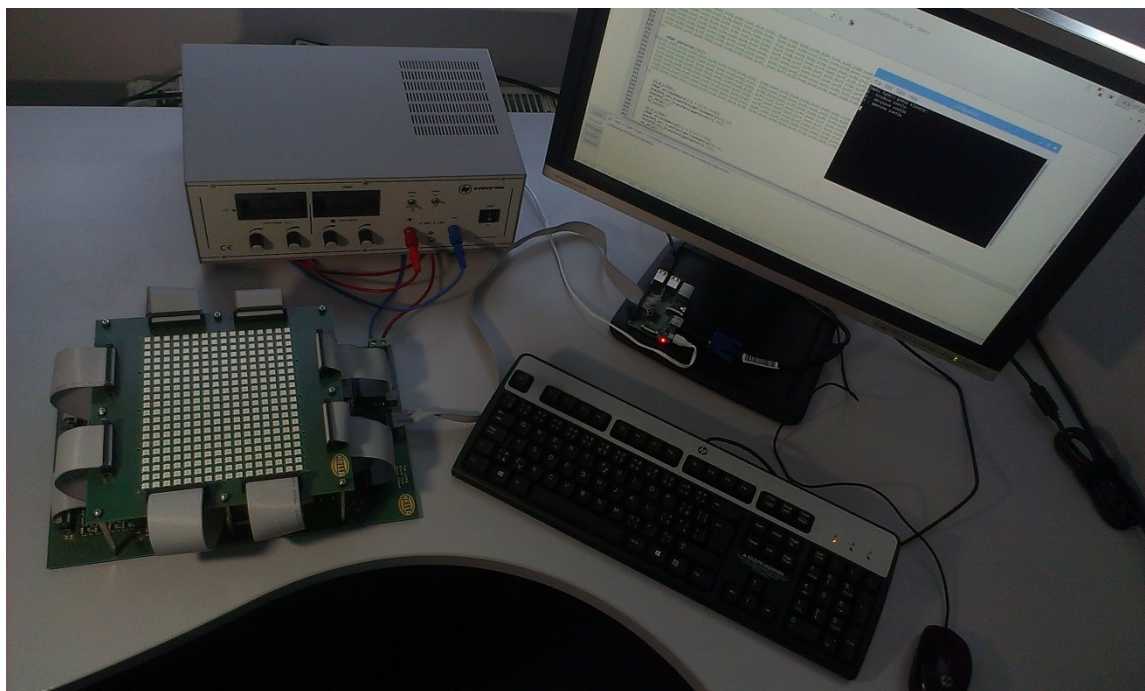
Obr. 43 – Doporučené rozmístění součástek obvodu STLED524



Obr. 44 – Navržené cesty pod obvodem STLED524



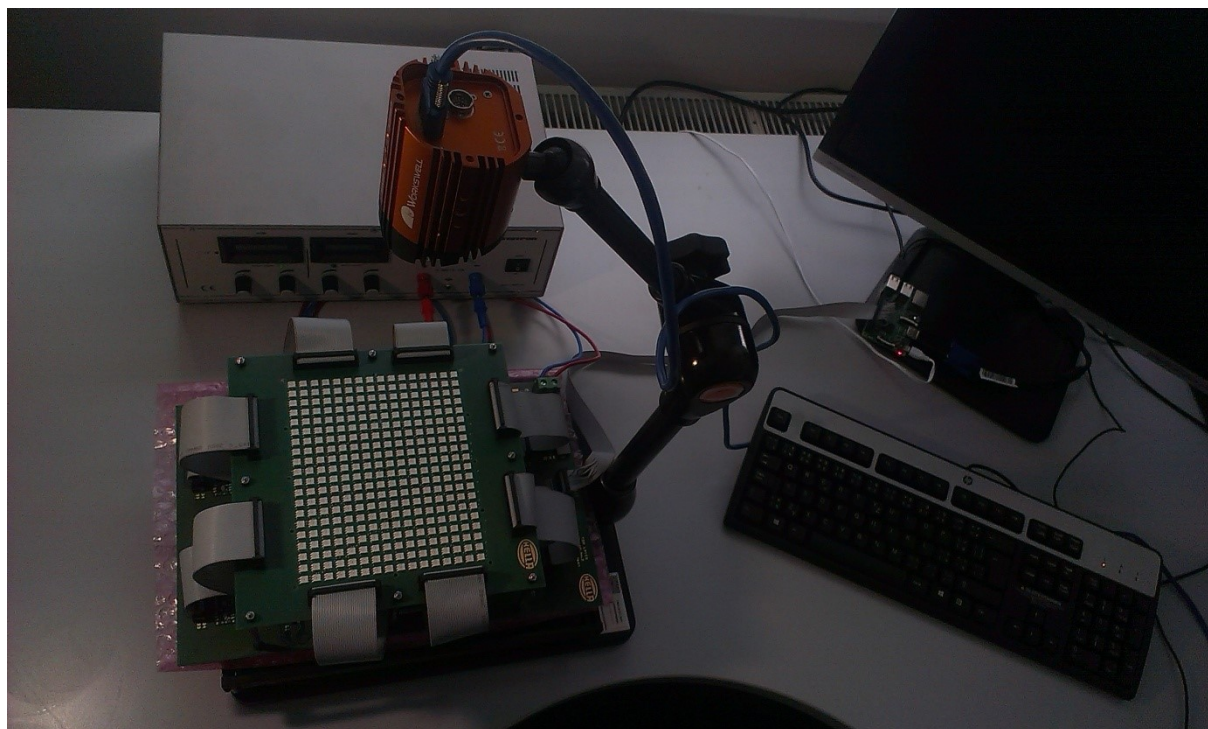
Obr. 45 – Vývojový diagram algoritmu pro řízení obvodů STLED524



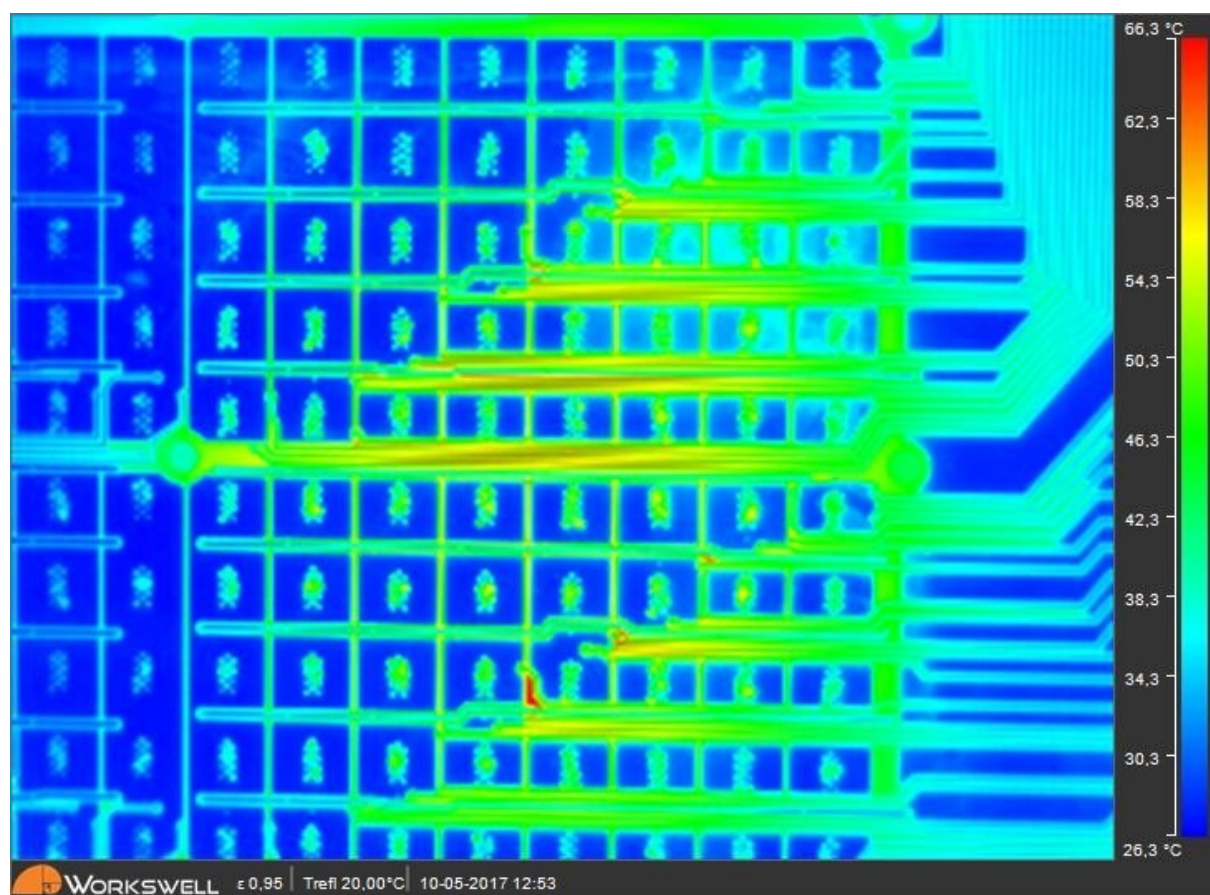
Obr. 46 – Pracoviště



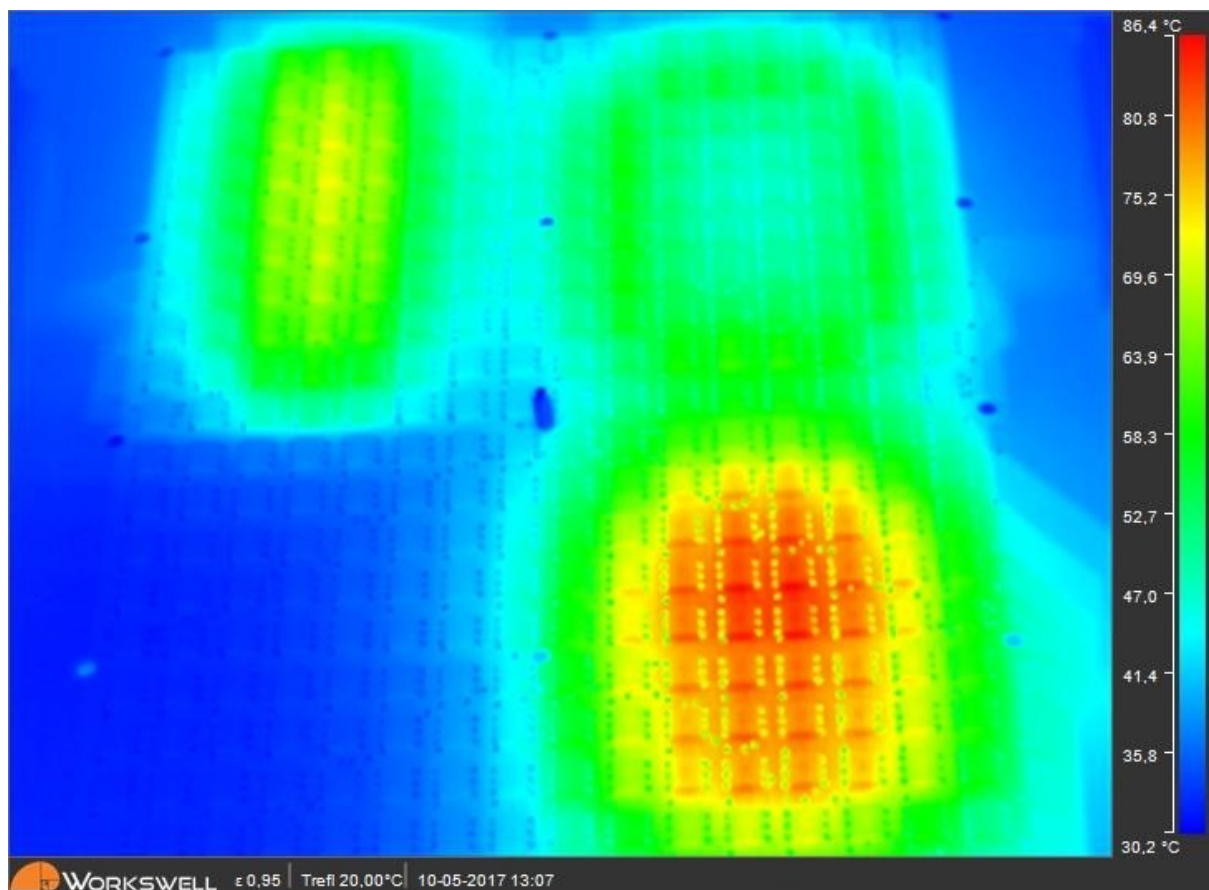
Obr. 47 – Funkce zadní svítlny (foceno přes svařovací sklo) – obrysové světlo (vlevo nahoře), brzdové světlo (vpravo nahoře) a směrové světlo (vlevo dole)



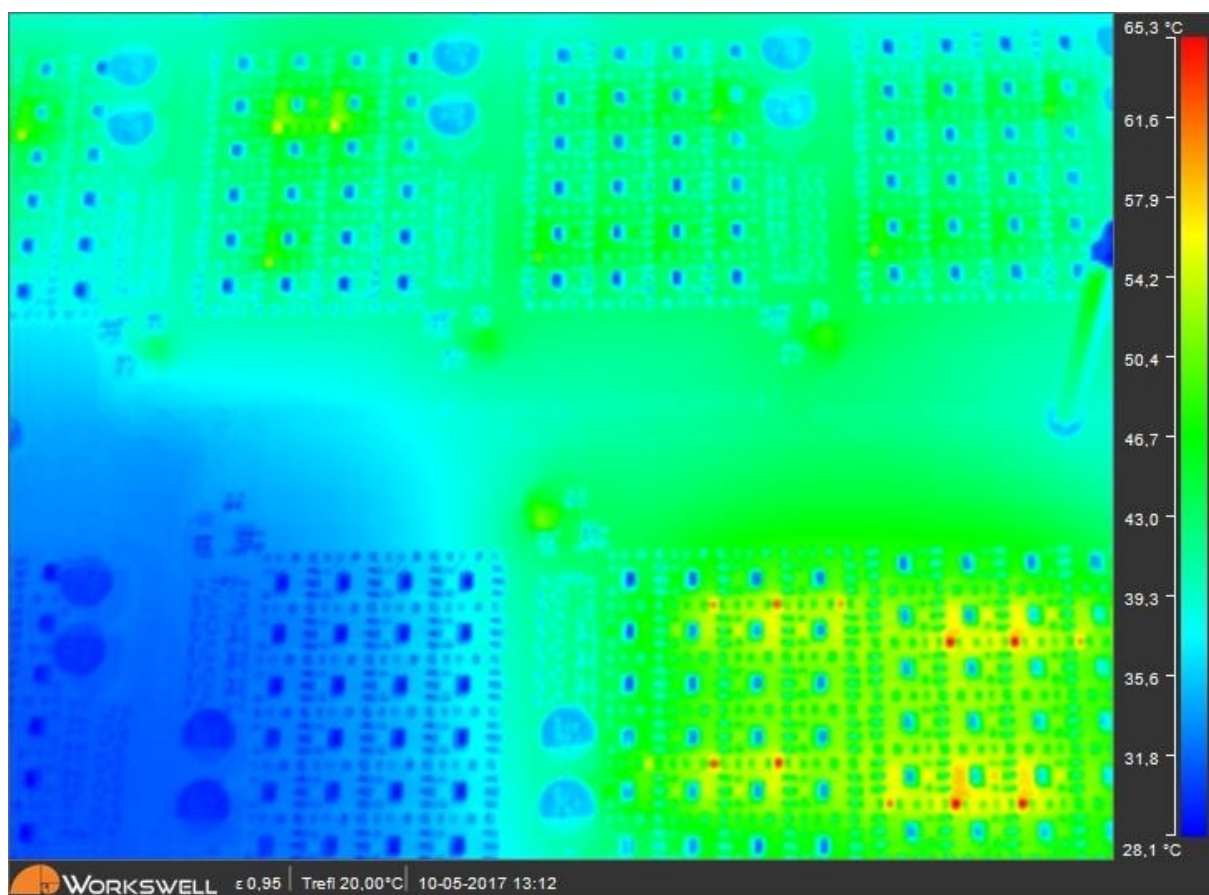
Obr. 48 – Měření emise tepla termokamerou



Obr. 49 – Pohled termokamerou ze spodní strany LED modulu (ve finálním stavu je zde umístěn chladič)



Obr. 50 – Pohled termokamerou na celý LED modul; brzdové světlo (vpravo dole), obrysové světlo (vpravo nahoře) a směrové světlo (vlevo nahoře) – nevyužitá část modulu (vlevo dole)



Obr. 51 – Pohled termokamerou na řidicí modul; brzdové světlo (vpravo dole), obrysové světlo (vpravo nahoře) a směrové světlo (vlevo nahoře) – nevyužitá část modulu (vlevo dole)

Zvláštní příloha

Viz přiložený CD-ROM.